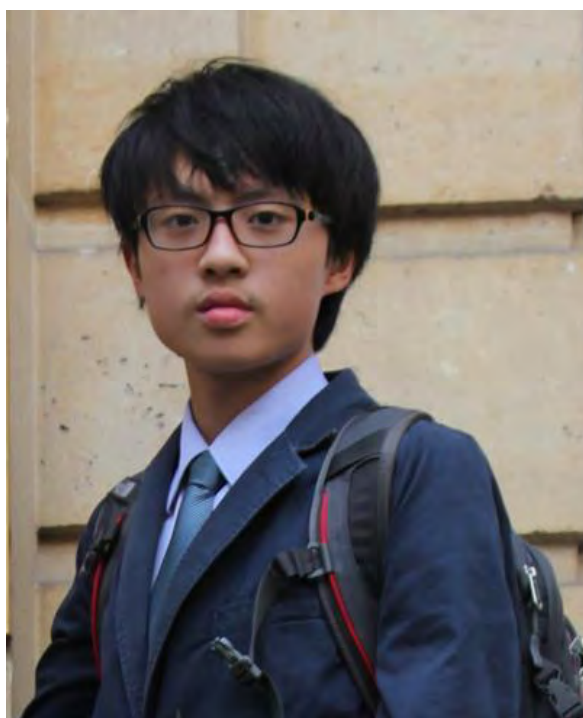


# 2015 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	100002
參展科別	工程學
作品名稱	以分頻多工及交流差動磁場強度為基礎之定位系統應用於無人飛行器控制系統的研究
得獎獎項	大會獎：一等獎 美國 ISEF 正選代表：美國第 66 屆國際科技展覽會 青少年科學獎 推薦參加英語測驗之指導教師
就讀學校	臺北市立建國高級中學
指導教師	王鼎中、陳伶志
作者姓名	陳韋同

關鍵字 單點定位(Single-Beacon Localization)、  
時變場型(Time-Varying Magnetic Field)、  
交流差動磁場強度(differential magnetic field strength)

## 作者簡介



大家好，我是就讀於台北市建國中學一年級的陳韋同。我從小就滿喜歡參加各種營隊及科學相關的展覽，如在美國參加太空及電腦工程相關的營隊；在美國參加營隊的時候也交了許多外國的朋友，我們不僅互相了解對方國家的文化，甚至討論太空及電腦工程相關的議題，相互成長。因為這些科學的探索，讓我從小就對科學研究有著濃厚的興趣，並在國一開始了科學研究並參加科展。

有了國中參加科學展覽的經驗，上了高中後，學校的研究法課老師也不斷鼓舞我繼續做研究。在這次科展過程中經過了不斷的模擬、實作、焊接，不只星期六日兩整天也都在作實驗，甚至平常上學日還要一直請假。雖結果常常不如預期，但我都持續努力並找出更好的解決方案。在這研究的過程中我要感謝師長們及家人的支持，他們除教導我這方面的知識外，還犧牲了他們許多時間來陪伴我。

未來我希望能將科學研究精神實踐在日常生活中，改善生活中不方便之處，這可讓我的生活充滿科學，充滿樂趣!

## 摘要

本研究提出一套創新的定位系統，僅需設置單一已知參考點即能達成高精確度的定位，由該參考點上的兩個永久磁鐵的靜磁場轉換成時變場型之交流磁場，再透過分頻多工的數位訊號處理，分離出這兩個磁場源之差動磁場強度及其相位，以求得物體的位置資訊，達成不受空間中的多重路徑干擾及障礙物影響的精確定位。透過實驗證明，本套系統在實驗設定下具有 10 公分以內的定位精準度，同時可以支援微型無人飛行器的即時定位，對於未來各種行動裝置、穿戴科技與自動控制系統之定位需求，可提供具體的貢獻。

## Abstract

This study introduces a magnetic positioning system which can be achieved by using only a single beacon for reference. This is a highly accurate positioning system equipped with two permanent magnets housed within a shell. The magnets generate an alternating magnetic field signal by converting the static magnetic field into a Time-Varying magnetic field, in which the pattern changes over time. The Frequency Division Multiplexing (FDM) is used to recognize the signal's amplitude and phases it simultaneously from every individual permanent magnet. Using this technology and the Time-Varying magnetic field, the position of objects can be determined by using only one point in space. The advantage of this magnetic positioning system is that it is not affected by the multipath effect of space, and offers excellent characteristics for penetrating various obstacles. According to the results of the study, this magnetic positioning system can achieve an accuracy to within 10cm; as has been observed under experimental conditions. It has also been applied to the control systems of UAVs in order to improve the capability of functioning in real time. This can be a great contribution to mobile technology, wearable technology, or automatic control systems in need of an advanced positioning system.

# 一、前言

## (一) 研究動機

近年來，無人控制裝置例如機器人、無人飛行器以及自動駕駛車等相關研究已被應用在多個領域，例如運送貨物、協助電影拍攝、協助救災及環境探勘或是作室內外的巡邏。由於無人控制裝置的協助，使執行工作的速度提升及多元化。

上述應用與現今蓬勃發展的物聯網有著緊密的連結，無人控制裝置上即有裝置多個感測器如攝影機、麥克風以及加速度計等能提供影像、音訊以及物體加速度等資訊，但是位置資訊的取得目前需要多個感測器的配合，收取來自三個以上的定位參考點的資訊才能準確得知物體在三維空間中的位置，此即造成設置定位參考點的成本及所需佔用的空間無法減少。

目前在戶外的無人控制裝置主要是倚靠全球定位系統(GPS)的協助獲得其位置資訊，使其穩定行動；而在室內執行任務時，則常使用的是無線射頻定位(RSSI)，藉由物體接收訊號的強度進行定位。然而，上述兩種定位系統皆有多重路徑干擾以及容易受到障礙物的影響等特性，這造成了其在執行定位時的準確度較不穩定，會隨環境而有所不同。本研究欲提出一種全新的定位系統，欲能改善現存定位系統的缺點，利用單一參考點達成精準的定位，而後欲利用控制難度高的微型無人飛行器，來評估此定位系統能否使無人控制裝置的控制系統快速穩定，為未來各種行動裝置、穿戴科技、機器人或無人飛行器的相關研究盡一份貢獻。

## (二) 研究目的

為了發展出一套僅需設置單一參考點且精確度高的定位系統，本研究提出了一個創新的想法，即由永久磁鐵的靜磁場轉換成隨時變場型的交流磁場，再利用通訊上的分頻多工(FDM)技術以及數位訊號處理，同時量測交流磁場源的差動磁場強度以及相位的資訊，進而獲得被定位物體與該參考點的距離以及角度資訊，便能夠以單一參考點估算出其在空間中的位置。之後，再藉由評估此定位系統應用於微型無人飛行器控制的可行性，了解其是否得以對於未來各種行動裝置、穿戴科技、與自動控制系統之定位需求提供具體的貢獻。本研究擬達成以下三個主要目標：

1. 以分頻多工(FDM)及差動磁場強度為基礎之定位系統建立
2. 結合時變場型之交流磁場的特性發展出單一參考點的定位系統
3. 評估本研究提出之定位系統應用於微型無人飛行器控制的可行性

## (三) 文獻探討

在確立本研究的目標之後，將對於目前在這領域的相關研究進行探討、歸納、整理等工作，並在最後進行比較，分析目前各個相關研究的優缺點並討論本研究欲達成之研究目標的可行性，在此將針對以下四大類現有定位系統進行探討。

### 1. 影像定位

影像定位又可分為兩種情形討論，分別是將多個攝影機裝置在一個空間中[1]，如天花板、角落等……，另外則是將攝影機裝設在欲被定位的物體上[2]。攝影機裝設在空間中的情形，需裝設三個攝影機以上，才可利用多點定位法則(Trilateration)來估算一未知點在空間中的位置；而另一將攝影機裝設在欲被定位物體上的情形，則是利用影像中所擷取到的特徵點來估算現在物體的所在位置。被定位物體透過影像移動的速度或特徵的改變等性質來更新下一時刻的位置，這種定位系統運算量極大，且在物體追蹤上有死角，是一個執行速度及準確度並不高的定位系統。

## 2. 無線射頻定位

無線射頻定位是目前常使用的一種定位系統，如 RFID 定位[3]、WIFI 定位[4]、藍芽定位[5]、Zigbee 定位[6]等……，而這些定位系統皆使用接收訊號強度(RSSI)技術進行物體與訊號源間的測距，而原理就是利用訊號強度隨距離衰變的這一項特質，並再利用多點定位法(Trilateration)或其他方法找出物體實際的位置。但是無線射頻的訊號容易被障礙物所影響且存在多重路徑的干擾，所以其定位的準確度還有待考驗。

## 3. 超音波、紅外線定位

超音波及紅外線定位其實與無線射頻定位的概念類似，只是將無線射頻改為超音波及紅外線的訊號，利用放置多個訊號(超音波、紅外線)發射源，而待測物體必須配備訊號的接收器，再藉由紅外線或超音波發射至接收的時間來推算與物體間的距離。此種定位方法雖成本低、易於實現，但是它容易受環境(光線、溫度)影響，且無法穿透障礙物，所以通常定位的結果誤差範圍較大[7]。

## 4. 分時多工(TDM)磁場定位

此定位方式需先在空間中架設多個電磁鐵產生交流磁場源，如下圖 1：

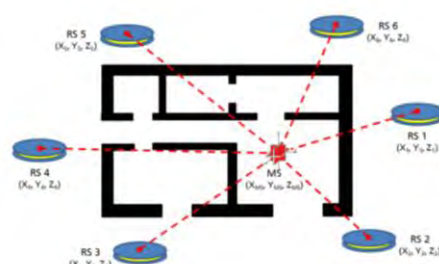


圖 1 分時多工磁場定位系統示意圖

在物體上裝設量測磁場感應強度的磁阻感測器，而為了不讓多個電磁鐵的磁場互相干擾，於是使用分時多工(TDM)技術來由物體的通訊裝置通知不同電磁鐵何時開與關，並由不同時間量測到的不同磁場感應強度判斷物體與該磁場源的距離，進而定位出物體現在的所在位置。此為針對各個磁場源逐一進行距離量測，必須將所有磁場源皆量測完畢後才可定位出距離，又物體必須與磁場源進行通訊，這對被定位物體是一重大負擔，運算所需花的時間也將較長 [8]。

## 5. 不同定位系統比較

本研究針對以上現有定位系統作詳細分析，將各個系統的優缺點統計如下表 1：

表 1 定位系統比較表

	運算時間	是否需要與待測物進行通訊?	架設系統的 便利性	誤差	受障礙物影響
影像定位	長	需要	低	大	是
無線射頻定位	短	不需要	普通	大	是
超音波、紅外線定位	短	需要	高	大	是
TDM 磁場定位	普通	需要	普通	小	否

由表 1 的比較可得，影像定位顯然運算時間不符合大多系統需求，而無線射頻定位會因為障礙物影響而使訊號反射，於是在距離的計算上將會造成誤差。又超音波、紅外線定位易受環境光源及障礙物影響，準確度不符標準，且超音波、紅外線定位與分時多工的磁場定位的待測物需與磁場源進行通訊，並和磁場源的時間同步來達到定位的目的，這使其運作速度相對較慢。本研究綜合以上比較結果，提出了一種利用分頻多工技術來量測多個交流磁場源的差動磁場強度以及相位資訊，進而求出待測物位置的定位系統，下表 2 為對此種定位系統的分析：

表 2 以分頻多工及交流磁場為基礎之單一參考點定位系統

	運算時間	是否需要與待測物進行通訊?	架設便利性	誤差	受障礙物影響
以分頻多工及交流磁場為基礎之單一參考點定位系統	短	不需要	高	小	否

如表 2，此種定位系統執行速度較快，且因其不受障礙物干擾，於是將更為精確，與分時多工磁場定位相比，待測物不需與磁場源進行通訊，且運算時間較短，可減少相當多的任務執行量。



## 二、研究方法與過程

本研究將依照圖 2 研究流程圖的步驟來執行。首先針對磁場感應強度量測距離的方法、分頻多工(FDM)技術、數位訊號處理、測量單元等背景知識，來進一步地深入研究。再者，擬定義出本研究的幾個問題，並試著提出對問題的解決方案，在此設計出本研究提出之單一參考點定位系統的流程，接著進行實作，蒐集實驗資料並記錄實驗結果，分析其是否具有穩定性及精確性，最後評估其運算量以及即時性是否滿足無人飛行器控制的需求。

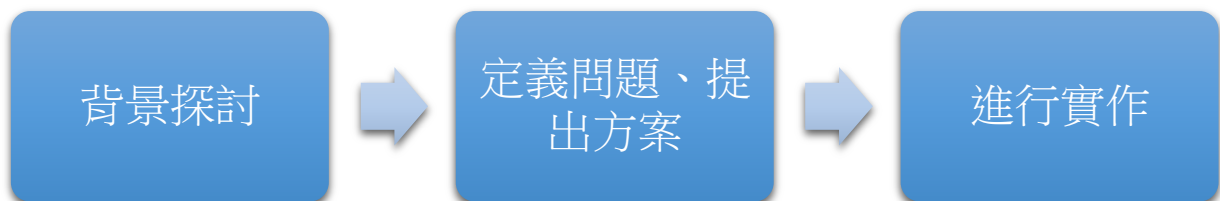


圖 2 研究流程圖

在研究過程中，若發現可改善的空間，此流程會重複上一步驟，並重新評估其可行性及提出其他方案，目的是欲達到更高的品質，使此研究更加完備接近理論設計。

## (一)背景探討

在背景探討的部分主要先針對如何利用磁場感應強度進行定位、分頻多工技術、數位訊號處理以及測量單元等在建立本研究提出之定位系統時所使用的技術、原理先進行研究、探討。

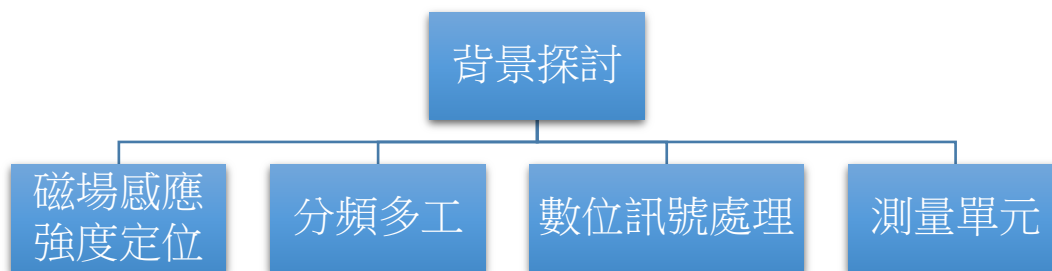


圖 3 背景探討內容架構圖

### 1. 磁場感應強度定位

在利用量測到的磁場感應強度資訊估算位置時，其背景探討主要可分為兩部分進行研究，分別是如何由磁場感應強度資訊計算與磁場的距離以及利用兩種定位的型態來得到位置資訊，這些在實作進行定位時將有相當大的幫助。

#### (1) 由多個磁場源之磁場感應強度計算位置

本研究由被定位物體上裝備的三軸磁阻感測器量測對磁場源的磁場感應強度，並且由此強度的變化計算出物體與該磁場源的距離，如下圖 4 中假設磁場源為一磁偶極子(Magnetic Dipole)，而物體 A 所量測到的便是磁場源所產生的磁場在該位置的磁場感應強度 $\mathbf{B}$ ，以及其分量 $\mathbf{B}_r$ 和 $\mathbf{B}_\theta$ 由直角坐標轉至極座標後再進行計算，如下公式(1)至公式(3)。(定 $\theta$ 向量逆時針方向為正； $r$ 向量背離參考點方向為正)[9]

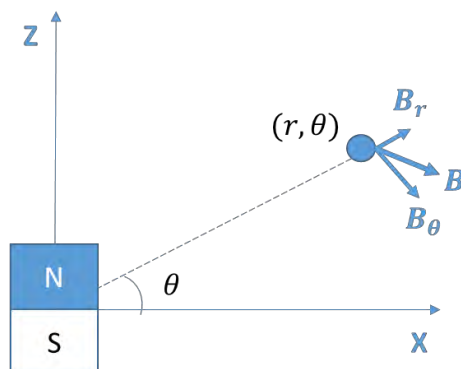


圖 4 磁偶極子產生磁場感應強度示意圖

$$\mathbf{B}_r = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2M}{r^3} \sin \theta \quad (1)$$

$$\mathbf{B}_\theta = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} \cos \theta \quad (2)$$

由公式(1)及(2)可推得公式(3)，為磁場感應強度與物體和磁場源距離的關係式：

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{M}{r^3} (2 \sin \theta \hat{\mathbf{r}} - \cos \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (3)$$

公式(1)至公式(3)中的 $r$ 代表磁場源到待測物體的距離， $\mu_0$ 為磁常數， $M$ 為磁偶極的磁矩常數(使用永久磁鐵需另外計算；使用電磁鐵則是線圈面積\*線圈匝數\*電流大小)， $\mathbf{B}$ 是磁場感應強度， $\theta$ 為磁場源與待測物之間的夾角。

在提出方案時，本研究會使用公式(3)來進行公式推導；而在實作時則先利用磁阻感測器量得交流磁場源造成的差動磁場感應強度，再套入公式(3)中，將該物體與磁場源的距離計算出來，進而利用下段提到的兩種定位型態來求得其位置資訊。

## (2) 定位型態

在此部分提出兩種位置的表現型態，主要針對位於三維空間的物體進行定位。

### a. 三邊定位法

三邊定位法(Trilateration)為利用三參考點與物體的距離求出物體的 $(x, y, z)$ 座標。此計算可由公式(4)到公式(6)來進行計算，而圖 5 為此定位法的示意圖[10]：

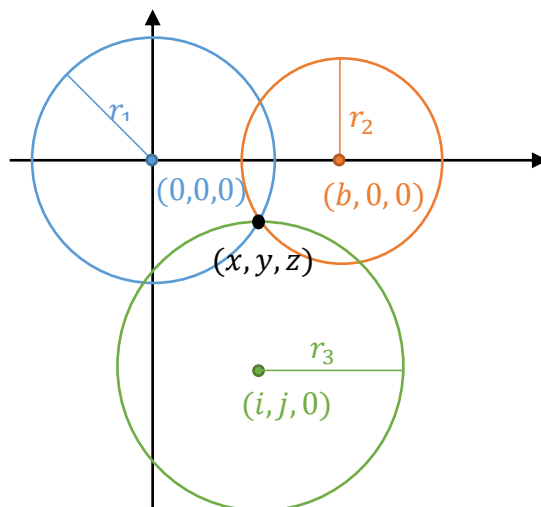


圖 5 三邊定位法示意圖

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + b^2}{2b} \quad (4)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad (5)$$

$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (6)$$

如圖 5 將三個參考點的座標定為 $(0,0,0)$ 、 $(b,0,0)$ 、 $(i,j,0)$ ，而其中 $r_1, r_2, r_3$ 分別代表物體 $(x,y,z)$ 與三個參考點的距離。在此種定位型態下 $r_1, r_2, r_3$ 為已知，再利用公式(4)至(6)得到物體的座標。

b. 極座標定位法(求出角度及半徑後計算出位置資訊)

根據圖 6 的示意圖，此種極座標定位法顧名思義就是將極座標所需的資訊 $(r, \theta, \varphi)$ 給計算出來，進而再利用公式(7)至公式(9)計算出 $(x,y,z)$ 。

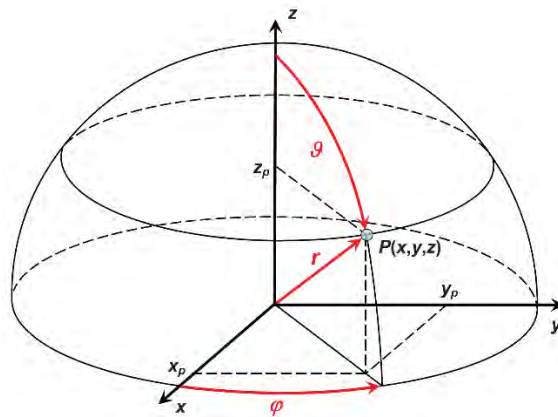


圖 6 極座標定位法示意圖[11]

$$x = r \sin \theta \cos \varphi \quad (7)$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi \quad (8)$$

$$z = r \cos \theta \quad (9)$$

此種定位法與三邊定位法不同之處在於此種定位法牽涉到角度，而三邊定位法則單純的利用物體與三個參考點的距離進行定位；另外此種定位法僅需單一的參考點便能求出極座標，相對於三邊定位法的三個參考點，可用較少的參考點數目得出物體的所在位置。

## 2. 分頻多工

分頻多工為多路復用(Multiplexing)技術的其中一種方式[12]。多路復用技術是將多個訊號源所發出帶信息的訊號利用不同的方式整合成一個訊號，且利用一個接收器接收訊號，目前整合成單一訊號的方式主要有三種方法：第一種為分時多工(TDM)，利用不同的時間順序依序將帶信息的訊號接收並處理[13]；第二種為分碼多工(CDMA)，將不同訊號源的訊號類似置入了一種辨識的密碼，使得接收器得以知道此訊號的發射源為何[14]；而第三種則是本研究所使用的分頻多工技術(FDM)[15]，分頻多工則是將不同發射源的訊號頻率調成不同的頻率，再將所有訊號整合成為一個訊號發出，則接收器可透過調整不同的接收頻率來獲取不同頻率訊號所附帶的信息，如下圖 7 所示：

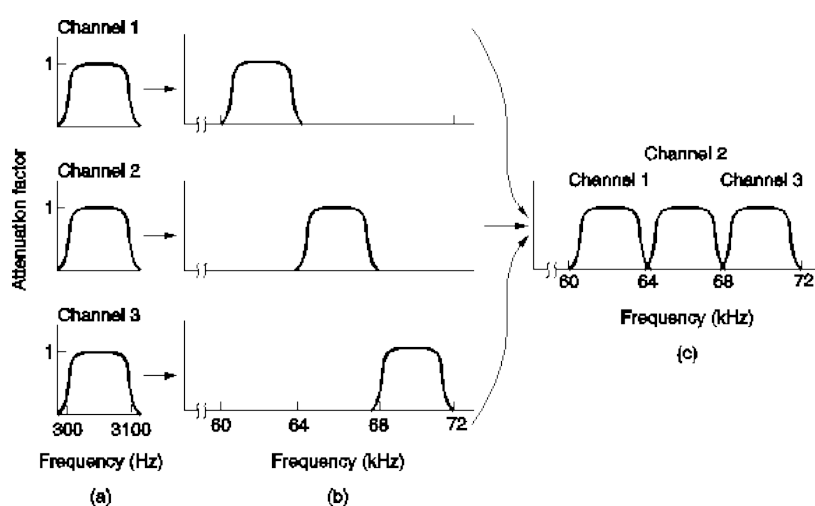


圖 7 分頻多工運作示意圖

由圖 7 可知，三個不同頻道(訊號源)所發出的訊號，經過(b)的動作將頻率分別調整為三個不同的頻率，最後再將其整合為一個訊號輸出，而接收方則可得知何訊號頻率區間為何頻道所發出之訊號。由我們生活中一個常見的例子解釋，收音機選擇不同電台的調頻，便是從一個訊號中利用頻率的不同獲取想要得到的訊息。

### 3. 數位訊號處理(Digital Signal Processing)

為了執行分頻多工，使物體分離出來自不同磁場源的訊號，本研究須採用數位訊號處理的技術。以下將針對本研究會使用到的數位訊號處理技術—離散傅立葉轉換進行詳細說明：

離散傅立葉轉換為傅立葉轉換的幾種形式中，唯一能夠藉由電腦進行訊號的運算及處理的計算形式，其運算的原理為將時域上離散的訊號點取一完整的週期，並假設該週期被無限複製使該訊號接近無限點，再執行傅立葉轉換，將處在時域的訊號轉成頻域，呈現出該訊號包含各頻率波的能量。本研究在實作過程中便藉離散傅立葉轉換，在固定的幾個頻域區間中，分析該區間中能量最大的頻率，這即能分離並辨別兩種以上不同的訊號，達成分頻多工，如下圖 8 為一例。

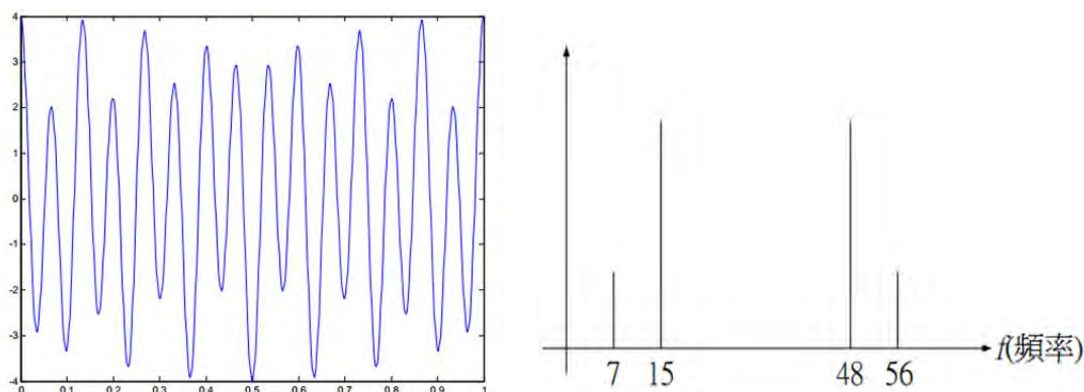


圖 8 由離散傅立葉轉換計算訊號的頻率成分

離散傅立葉轉換為訊號在時域與頻域上的轉換方式，以下公式(10)及公式(11)即為時域訊號的有限序列以及頻域序列的轉換對[16]：

$$\tilde{x}[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \tilde{X}[k] e^{j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (10)$$

$$\tilde{X}[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \tilde{x}[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (11)$$

公式(10)及公式(11)為離散傅立葉轉換對，將時域的訊號轉換成頻譜係數序列， $\tilde{x}[n]$ 為時域訊號序列， $\tilde{X}[k]$ 為頻域係數序列， $N$ 為訊號的基本週期。離散傅立葉轉換便是利

用此數學的方式將有限、離散的序列，複製至無窮多個點後再進行轉換。

若要進行以上運算，則充要條件是訊號的一個週期的最後一點必須與下一個週期的第一點是相連的，不能隨便給予電腦計算一個頭尾不相連的訊號，這樣即造成在訊號接合處會有一個顯著的落差，造成訊號轉換至頻域時，其基本頻域的能量皆被分散到其他的頻率之上，無法真是呈現訊號的頻率組成。但是，每次擷取訊號時皆要計算一個周期的點數或是注意訊號的一個週期的頭與尾是否相連是一件困難且麻煩的事，於是這時就要使用窗口函數，將每次擷取的訊號皆乘上窗口函數，讓任何擷取到之訊號的前端與尾端壓抑至趨近於 0，這即能使所有訊號在進行窗口運算後皆得以做離散傅立葉轉換，並成功呈現出真實的數值，如下圖 9 為訊號進行窗口運算的一個例子。

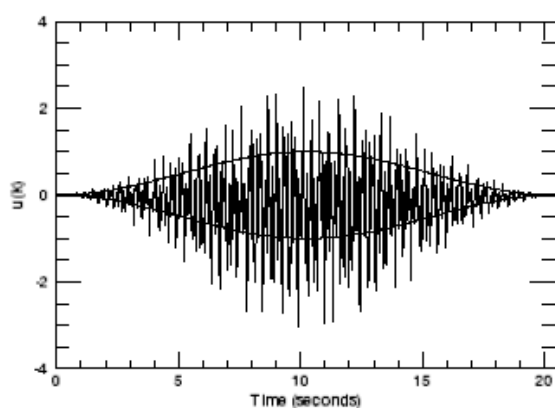


圖 9 Hanning 窗口函數實際使用例子

Hanning 窗口函數為眾多窗口運算的其中一種形式，可由上圖 9 看出，訊號在乘上 Hanning 窗口函數後，前端和後端的訊號大小已趨近於 0，於是便可將此訊號進行離散傅立葉轉換，此窗口函數的公式如下公式(12)。[17]

$$Hann(n) = 0.5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N} \right) \right) \quad (12)$$

使用窗口函數的最主要目的為方便進行離散傅立葉轉換的應用，但是其有一個小缺點，即為訊號轉換至頻域時，能量會分散到基本頻率附近的三個頻率上，而非單一頻率，不過此能量的分配為線性分配，可再藉由內插法求出訊號的真實頻率。下圖 10 為此現象的示意圖：

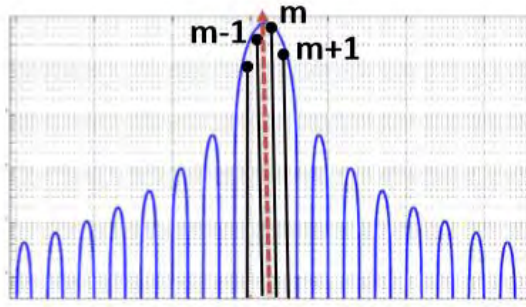


圖 10 使用 Hanning 窗口函數之訊號轉至頻域後之結果示意圖

訊號使用窗口函數後即造成訊號失真，此時若要進行振幅、相位、頻率等訊號基本資訊的計算時，則必須先將訊號還原後才能進行計算。跟據上圖 10，其中最主要能量分配的三個頻率  $m - 1$ 、 $m$  以及  $m + 1$  的  $\tilde{X}[m - 1]$ 、 $\tilde{X}[m]$  以及  $\tilde{X}[m + 1]$  在計算出來後可透過以下公式(13)至公式(17)求得振幅、相位、頻率等基本資訊[17]。

$$Y_m = \sqrt{(\text{Im}\tilde{X}[m])^2 + (\text{Re}\tilde{X}[m])^2} \quad (13)$$

$$\Delta m = \begin{cases} \frac{2Y_{m+1} - Y_m}{Y_{m+1} + Y_m}, & \text{if } Y_{m+1} \geq Y_{m-1} \\ \frac{Y_m - 2Y_{m-1}}{Y_{m-1} + Y_m}, & \text{if } Y_{m+1} < Y_{m-1} \end{cases} \quad (14)$$

$$f = (m + \Delta m) \frac{f_{\text{sampling}}}{N} \quad (15)$$

$$A = \frac{2\pi\Delta m Y_m}{N \sin(\pi\Delta m)} (1 - \Delta m^2) \quad (16)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\text{Im}\tilde{X}[m]}{\text{Re}\tilde{X}[m]}\right) - \Delta m\pi \quad (17)$$

公式(13)中的  $Y_m$  為訊號經離散傅立葉轉換從時域轉換至頻域後，頻率  $m$  所擁有的能量，其為該頻率的係數之虛部的平方與實部的平方之和取平方根的結果。公式(14)中  $\Delta m$  代表的是頻率  $m$  與真實頻率的差異；而公式(15)中的  $f$  代表訊號頻率， $f_{\text{sampling}}$  代表取樣頻率， $N$  代表取樣點數；公式(16)中的  $A$  代表訊號的振幅，最後，公式(17)的  $\phi$  則為擷取到之訊號的第一個點的相位資訊。

在實作過程中，本研究便會使用公式(10)及公式(11)進行離散傅立葉轉換，再由公式(12)產生一個 Hanning 的窗口函數，最後再由公式(13)至公式(17)求出訊號的基本資訊，欲能協助達成本研究的研究目標



#### 4. 測量單元

以下將介紹 MEMS 測量單元的詳細資訊[18]：

##### (1) MEMS 三軸陀螺儀與三軸加速度計

由此兩種測量單元裝置的配合，能估計物體的移動狀態，組合成為慣性測量單元 (IMU)。慣性測量單元一般裝在需要進行運動控制的設備上，且裝置在此設備的重心上，常包含三軸陀螺儀來測量對三軸旋轉的角度，以及加速度計來測量加速度大小。慣性測量單元輸出的訊號會先將常態誤差和一些雜訊消除後傳至控制中心作分析處理後，估算出當前狀態，再由 PID 控制器來針對將目前物體之狀態進行調整，使設備達到一個穩定的狀態[18]。

##### (2) MEMS 三軸磁阻感測器

三軸磁阻感測器為測量空間中三個軸方向的磁場感應強度之感測器。本研究所採用的三軸磁阻感測器型號為 HMC1053，選用此型號的感測器之最主要原因為體積較小，且其解析度相較於其他感測器較高，可量測到甚至是 $120\mu G$ 的訊號，更重要的是此感測器相對於大多數的三軸磁阻感測器，並無使用內建的類比-數位轉換器，於是可針對此尋找類比-數位轉換速度較快的轉換器，以達到本研究對於系統即時性的需求[19]。

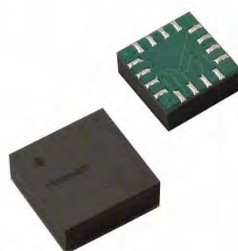


圖 11 HMC1053 三軸磁阻感測器

此種測量單元的測量原理是利用一鎳鐵合金的特殊材質，其電阻值大小會隨著磁場變化而改變，這也是此測量單元稱磁阻感測器的原因。由於電阻值會隨著磁場大小變化而改變，導致輸出電壓也會隨著改變，於是便可藉由測量電壓來得知量測到之

磁場感應強度量值。

磁阻感測器在每次進行測量前後必須要執行設定以及重設的步驟[19][21]，使其磁阻材質內的磁偶極子朝同一方向排列，將每次測量時的感測器敏感度維持一定，才能用差動磁場強度來計算與物體的距離，而或利用交流磁場訊號來計算物體與參考點的角度，如下圖 12 所示：

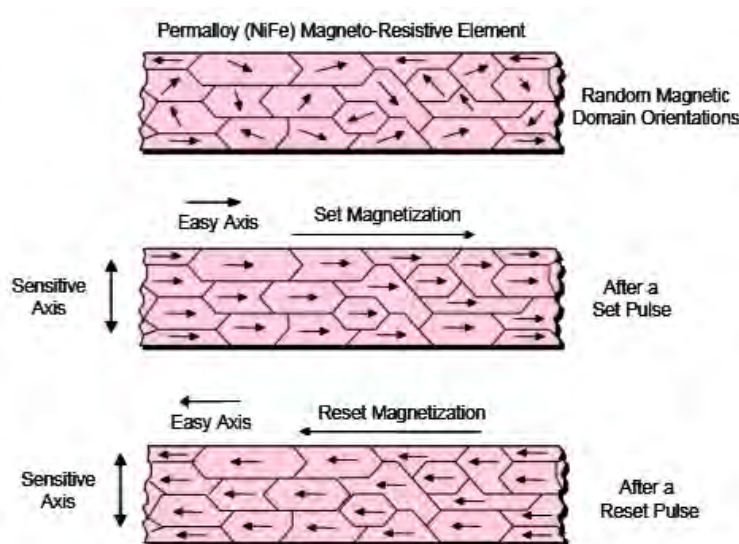


圖 12 特殊磁阻材質內磁偶極子在設定與重設前後的排列情形

圖 12 中的磁偶極子在沒有送入設定以及重設的訊號之前，排列的順序雜亂無章，毫無規則可言，這造成了此磁阻材質對磁場的敏感度大幅降低，所以在沒有送入設定以及重設訊號之前，感測器無法做量測使用。在送入訊號後，根據圖 12 下面兩個排列示意，材質中的磁偶極子排列方式已有規律，即可進行量測，於是在進行實作時要先設計產生瞬間、大電流的設定及重設訊號的產生電路，使磁偶極子的排列呈一致方向。

本研究在實作過程中除了會利用 HMC1053 作為三軸磁阻感測器之外，為求實驗方便以及尋求理論的可重複性，亦會使用 HMC1022 二軸磁阻感測器作為量測距離及場型時的測量單元，此單元也需使用同樣的設定/重設機能，才可使其敏感度維持同樣的水準。

經上述的背景探討後，本研究已對實作時會使用到的技術做詳細的探討，之後便可參考背景探討之公式及原理，使研究過程更加順利。

## (二) 定義問題及提出解決方案

本研究針對幾個問題提出相對應的解決方案，在此將詳細介紹如何解決該問題及使用這些方案的原因，並將各個方案整合，設計出一套以單一參考點之定位系統。

### 1. 定義問題

下表 3 為本研究定義之問題及所提出之解決方案，並且說明為何提出此解決方案，關於方案的詳細內容將在下一節說明。

表 3 定義問題及提出解決方案

定義問題(What?)	提出解決方案(How?)	為何用此方案(Why?)
如何產生穩定的交流磁場源?	(1) 將永久磁鐵固定在馬達轉軸，使馬達轉動即可得到隨時間改變場型的交流磁場訊號	(1) 與電磁鐵相比： a. 體積較小 b. 電流及耗電功率較小 (2) 產生隨時間改變場型的交流磁場訊號，可藉由物體量測之訊號與參考點量測之訊號的相位差求出角度
如何利用單一參考點得到物體 XYZ 的精確位置資訊?	(1) 設置一個包含雙交流磁場源的定位參考點 (2) 由量測之交流磁場訊號計算與該參考點的距離以及 $\theta$ 和 $\varphi$ 角，並得到物體的位置資訊	(1) 利用磁場進行定位不受多重路徑干擾及障礙物影響 (2) 設置兩個交流磁場源分別求出 $\theta$ 和 $\varphi$ 角，可減少定位參考點擺放的數量
如何同時獲取多個磁場源的磁場強度訊號以及相位資訊?	(1) 使用分頻多工(FDM)技術同時量測來自多個磁場源的磁場強度訊號 (2) 利用特定點之離散傅立葉轉換將訊號由時域轉至頻域，分離出不同頻率的訊號，並求出該訊號的相位以及強度等資訊	(1) 利用分頻多工，則物體不需逐一與磁場源進行通訊，即可同時獲取多個磁場強度訊號 (2) 特定點之離散傅立葉轉換相較於其他的數位處理方式可獲得較多的資訊，且分離後與原訊號的失真程度較小，而處理的速度也相對較快

### 2. 提出解決方案

本研究將提出之解決方案歸納成以下五點說明：

- (1) 量測隨時間改變場型的交流磁場得知物體與參考點的角度
- (2) 將永久磁鐵的靜磁場藉機械的方式轉成隨時間改變場型的交流磁場
- (3) 設置一個包含雙交流磁場源的定位參考點
- (4) 利用分頻多工及特定點之離散傅立葉轉換同時處理兩個磁場源的訊號
- (5) 藉物體的訊號之差動磁場強度及與參考點之訊號的相位差求出 $(r, \theta, \varphi)$

下列為本研究提出之解決方案的詳細說明:

### (1) 量測隨時間改變場型的交流磁場得知物體與參考點的角度

根據文獻，為了達成利用單一參考點進行精準的定位，必須得到物體的極座標來做定位才可。目前磁場定位所使用的磁場源皆為電磁鐵，並透過送入交流電訊號使其產生一交流磁場訊號，但其場型皆為固定，無法求出物體與參考點的角度；可是極座標中有兩變量為角度的資訊，於是本研究創新的提出一種想法，可利用量測隨時間改變場型的交流磁場得知物體與參考點的角度。產生隨時間變化場型的方式有兩種，一種是利用旋轉的永久磁鐵，而另一種則是利用十字型的電磁鐵來將此種特殊的量測方式模型化，以下為其詳細說明：

首先先來為以下說明定義角度以及座標軸方向，如下圖 13。

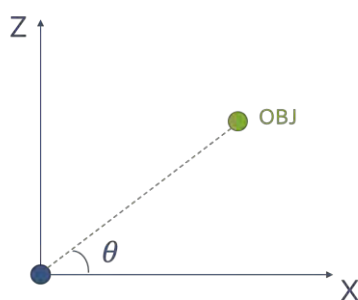


圖 13 座標軸及角度定義圖

根據圖 13， $\theta$ 的定義為物體與 X 軸的夾角，以下說明便遵循如此的設定，橫向為 X 軸，縱向為 Z 軸。

下圖 14 至圖 17 為利用旋轉永久磁鐵產生隨時變場型的交流磁場之示意圖。

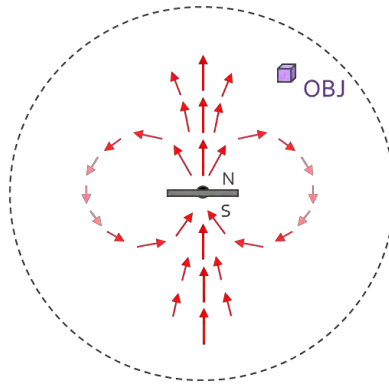


圖 14 時間序 $t_1$ 時永久磁鐵轉至 $\theta = 90^\circ$ 之位置所產生之場型

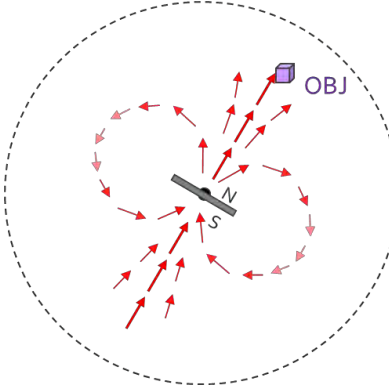


圖 15 時間序 $t_2$ 時永久磁鐵轉至 $\theta = 45^\circ$ 之位置所產生之場型

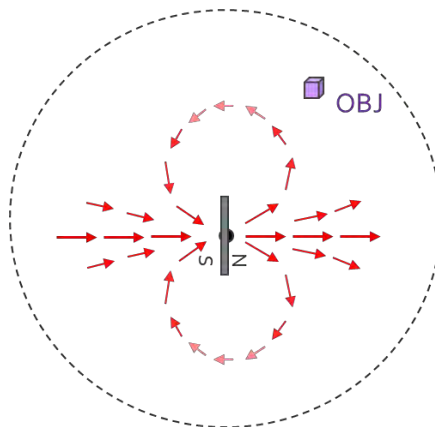


圖 16 時間序 $t_3$ 時永久磁鐵轉至 $\theta = 0^\circ$ 之位置所產生之場型

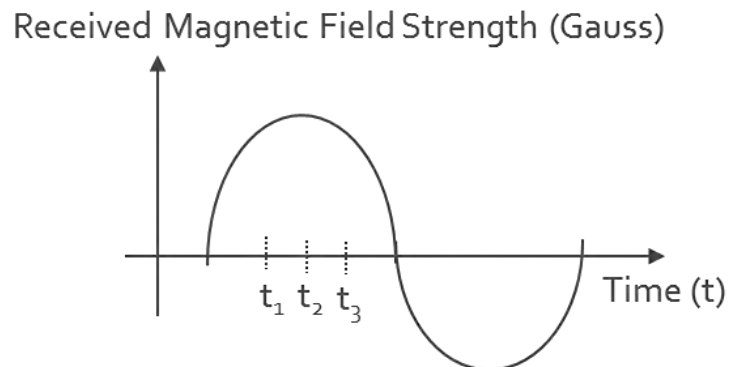


圖 17 物體(OBJ)量測之磁場感應強度訊號

由圖 14 至圖 16 可看出旋轉的永久磁鐵所產生的場型會隨著時間改變，而永久

磁鐵的 N 極在  $t_2$  時對到了物體，於是物體所量測到的磁場感應強度在這個時間序時會是最大的，可由圖 17 的磁場感應強度訊號中看出。本研究所提出的方案便是遵循此概念，在參考點旁放一磁阻感測器作為  $\theta = 0^\circ$  的基準，再將同一時間物體量測之訊號以及基準感測器量測之訊號的相位差紀錄下來，此即可求出角度的資訊，如下圖 18。

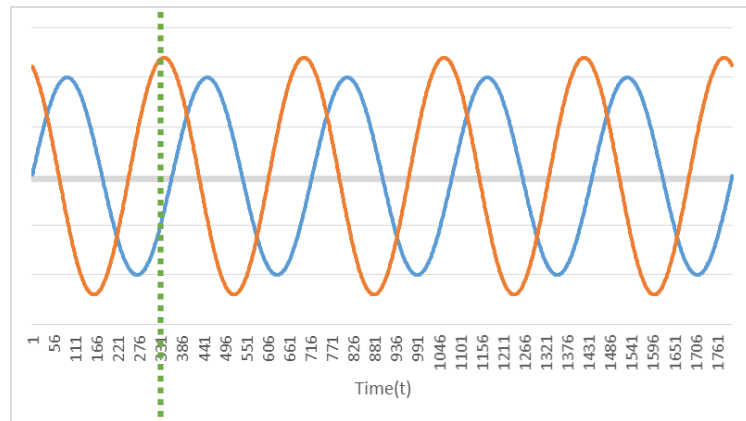


圖 18  $\theta = 0^\circ$  的基準感測器與物體感測器所量測之磁場感應強度訊號示意圖

上圖 18 中橘色的訊號假設為在參考點旁之基準磁阻感測器所量測到的磁場感應強度訊號，而藍色的訊號為物體所量測之訊號。綠色虛線所代表的是同一時間點各訊號的相位，可看出橘色訊號的相位趨近  $90^\circ$ ，而藍色訊號在該點的相位則趨近  $330^\circ$ ，於是此二訊號的相位差可用其最小正同界角以及最大負同界角來表示，分別為  $240^\circ$  以及  $-120^\circ$ ，於是利用此方法便可算出物體在空間中  $\theta$  角的數值。

上述此種利用永久磁鐵產生隨時間改變場型的交流磁場，並透過兩個訊號的相位差計算出角度資訊的量測方法可用十字型的電磁鐵來將此種特殊的量測方式模型化，並證明訊號的相位差即為兩物體在空間中的角度，說明如下：

背景探討時所討論之公式(3)為單獨一個磁鐵(磁偶極子)對空間中的物體所造成的磁場感應強度，公式中並無時間的變數，於是該磁場源對物體的磁場感應強度為固定的，且該磁場源造成的磁場的場型也會是固定的，所以公式(3)並沒有辦法描述隨時間改變場型的交流磁場，更沒有辦法說明為何此概念可量測物體在空間中的角度。在此本研究提出了一個新的解釋方式，欲將利用旋轉永久磁鐵產生隨時間改變場型的交流磁場的過程利用公式說明，首先將背景探討中圖 4 的模型依同樣的定義



方式將其中一個電磁鐵的磁軸擺放為垂直方向，而另一個電磁鐵的磁軸擺放為水平方向，如下圖 19：

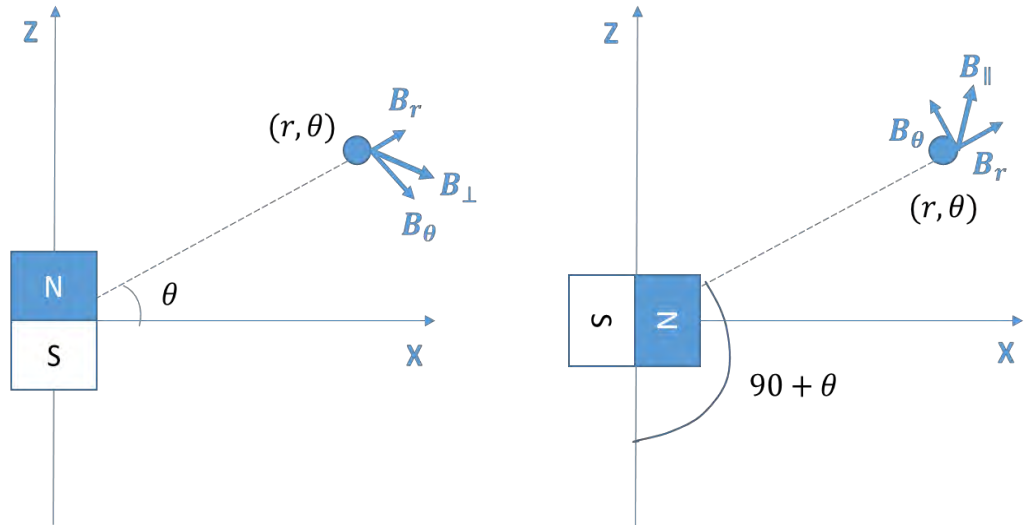


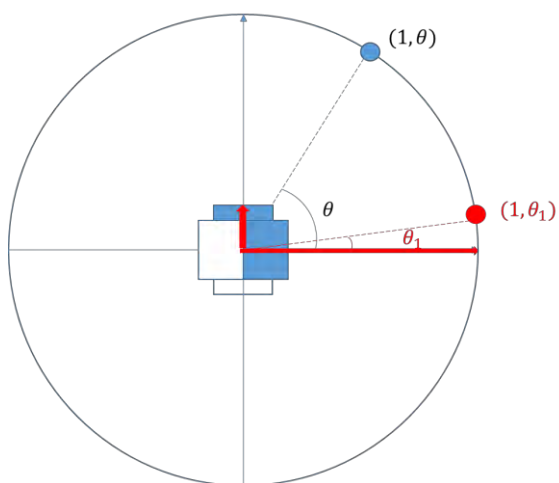
圖 19 電磁鐵磁軸擺放方向不同的系統示意圖

圖 19 中左圖為電磁鐵的磁軸垂直方向擺放的情形，而右圖為電磁鐵的磁軸水平方向擺放的情形。本研究便依公式(3)相同推導的方式推導出圖 19 中右圖的電磁鐵對物體造成的磁場感應強度，如下公式(18)及公式(19)。(左圖的磁場感應強度的計算公式與公式(3)相同)

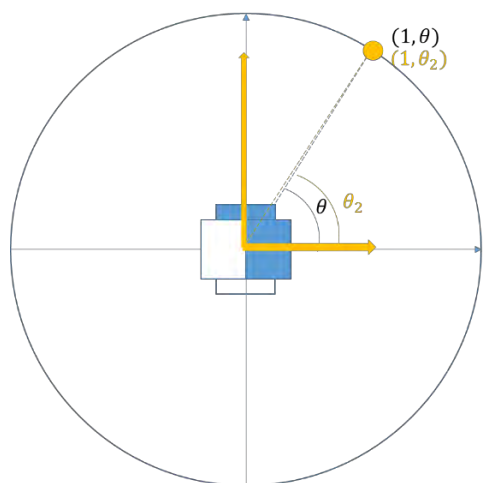
$$\mathbf{B}_{\perp} = \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \sin \theta \hat{\mathbf{r}} - \cos \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_{\parallel} = \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \sin(90 + \theta) \hat{\mathbf{r}} - \cos(90 + \theta) \hat{\boldsymbol{\theta}}) = \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \hat{\mathbf{r}} + \sin \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (19)$$

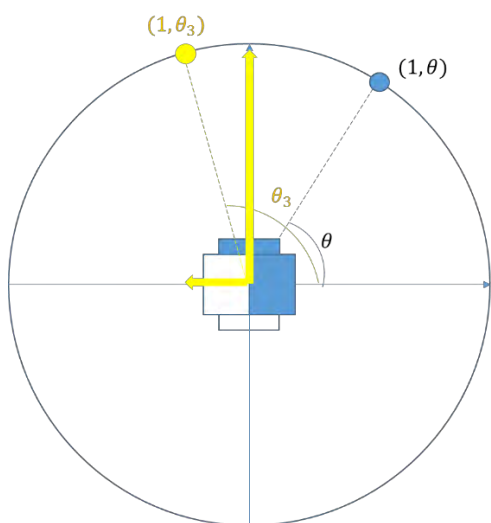
之後，將磁軸擺放垂直方向與水平方向的電磁鐵放在同一個點上，對垂直的電磁鐵送入 sin 波；對水平的電磁鐵送入 cos 波，如下圖 20。



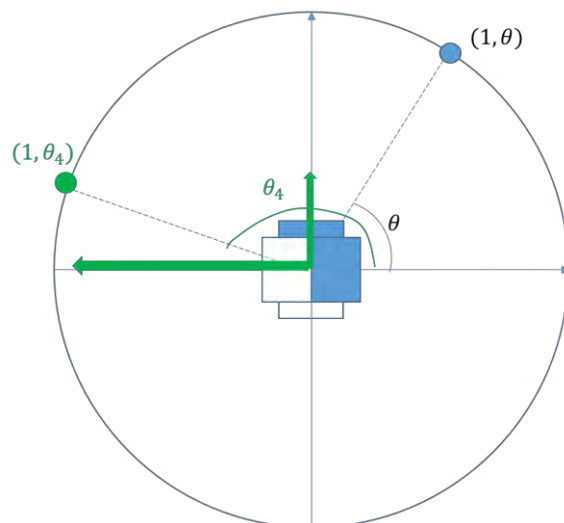
(a)  $t_1$ 時兩軸磁場強度與訊號峰值出現位置



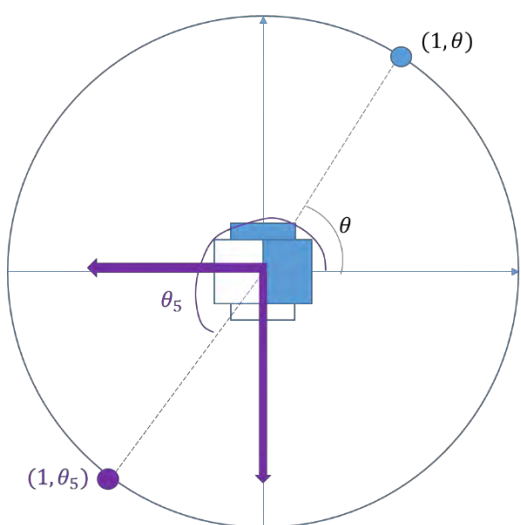
(b)  $t_2$ 時兩軸磁場強度與訊號峰值出現位置



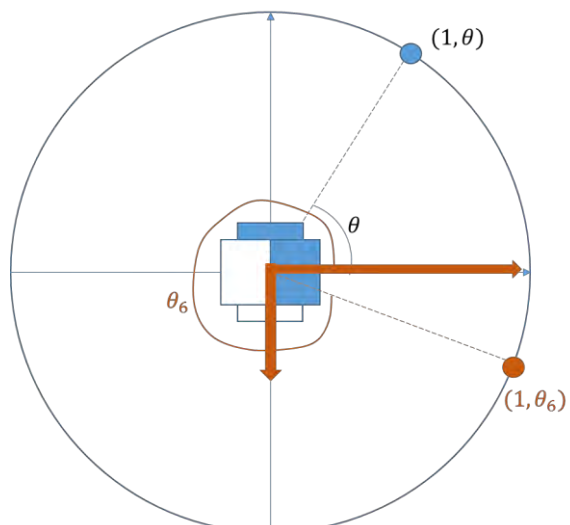
(c)  $t_3$ 時兩軸磁場強度與訊號峰值出現位置



(d)  $t_4$ 時兩軸磁場強度與訊號峰值出現位置



(e)  $t_5$ 時兩軸磁場強度與訊號峰值出現位置



(f)  $t_6$ 時兩軸磁場強度與訊號峰值出現位置

圖 20  $t_1 \sim t_6$ 時刻兩電磁鐵產生的磁場強度變化以及等距下最大磁場感應強度之位置



以圖 20 中的(a)圖為例說明，紅色箭頭的長度為電磁鐵所產生的磁場強度，因為其為單位圓，所以同一軸的數值將只會在 1 到-1 之間改變，若為水平方向的磁場強度則為  $1 \times B_{\parallel}$ 、 $0.8 \times B_{\parallel}$ 、 $0.6 \times B_{\parallel}$ 、 $0.4 \times B_{\parallel}$  隨時間變化至  $-1 \times B_{\parallel}$ 。

為了要使其具有與永久磁鐵轉動相同的特性，即為磁鐵 N 極轉至面對該物體時，該物體會量測得比等距下不同角度的物體所量測之訊號強度更強，所以垂直的電磁鐵與水平的電磁鐵分別要以 sin 波以及 cos 波的形式，隨時間改變產生之磁場感應強度。若垂直擺放的電磁鐵則依  $\sin 0^\circ \times B_{\perp}$ 、 $\sin 30^\circ \times B_{\perp}$ 、 $\sin 60^\circ \times B_{\perp}$ 、 $\sin 90^\circ \times B_{\perp}$  進行循環；反之，水平擺放的電磁鐵則依  $\cos 0^\circ \times B_{\parallel}$ 、 $\cos 30^\circ \times B_{\parallel}$ 、 $\cos 60^\circ \times B_{\parallel}$ 、 $\cos 90^\circ \times B_{\parallel}$  進行循環。

圖 20 的(a)至(f)圖便是利用此概念，在各時間內都會有一個獨立的點所收到的磁場感應強度量值為交流訊號的峰值，可發現於  $t_2$  時峰值出現處與物體實際位置重合，表示物體在該時刻所量測到的磁場感應強度為一個循環當中的最大值，進而代表當下的角度  $\theta_2$  為物體與水平面之間的角度。藉此，便能利用電磁鐵的方式來將永久磁鐵產生隨時間改變場型的交流磁場的過程重現，並得以利用以下公式(20)來進行解釋。

$$\mathbf{B} = B_{\perp} \sin(2\pi ft) + B_{\parallel} \cos(2\pi ft) \quad (20)$$

公式(20)中的  $f$  代表該磁場源的磁極轉換頻率(或馬達轉動頻率)，以  $Hz$  為單位， $t$  代表系統開始執行後到量測訊號當下所經過的時間，以  $sec$  為單位。

公式(20)中與平常計算磁場感應強度的公式最大不同之處為其有一個時間的變數，也就是說物體在不同時間所量測到的磁場感應強度是不一樣的，而這便是時變場型的概念。

本研究將磁場感應強度於經  $\theta$  角(也就是物體的實際角度)後量測之值為峰值的此項陳述之證明置於附錄，經此證明便可說明由兩個物體量測之訊號的相位差能夠算出兩個物體的角度。

## (2) 將永久磁鐵的靜磁場藉機械的方式轉成隨時間改變場型的交流磁場

為了使磁場源產生一穩定的交流磁場，本研究決定將永久磁鐵裝置在馬達的轉軸上，並透過啟動馬達帶動磁鐵的旋轉，產生一穩定的交流磁場源，而磁場源變換的頻率便可由馬達的轉速決定。選擇此方案的原因是，電磁鐵相較於永久磁鐵具有以下缺點：

### a. 電流與電功率過大

根據公式(3)，電磁鐵為了產生強度較強的磁場，需要較大的電流，通常會使用到 10A 以上的電流。此不僅有安全性上的考量，電功率的消耗量也是馬達轉動的 10 倍以上，此為不考慮使用電磁鐵的原因之一。

### b. 體積過大

根據公式(3)，影響磁場感應強度的另一變因是線圈的面積。為了產生強度較強的磁場，相對於本研究提出之利用永久磁鐵產生交流磁場的方案，會使用體積較大的電磁鐵，這在裝設上既不方便，實際應用時也因其體積占相當大的空間，造成些許不便。本研究為針對(a)(b)兩點進行不同體積的磁鐵與電磁鐵的統計分析，而完成下表 4；然而下圖 21 為其磁場感應強度的比較圖：

表 4 不同磁鐵與電磁鐵的比較

編號	長(m)	寬(m)	厚(m)	體積(m <sup>3</sup> )	磁場感應強度(Gauss)	電流(A)	線圈面積(m <sup>2</sup> )	匝數(圈)	體積(m <sup>3</sup> )	磁場感應強度(Gauss)	功率(W)
1	0.1	0.075	0.0005	0.00000375	8.47238E-06	10	1	500	0.1	0.001591549	200
2	0.15	0.125	0.0025	0.000046875	0.000105867	10	2	500	0.2	0.003183099	200
3	0.2	0.175	0.0045	0.0001575	0.000355578	10	3	500	0.3	0.004774648	200
4	0.25	0.225	0.0065	0.000365625	0.000825114	10	4	500	0.4	0.006366198	200
5	0.3	0.275	0.0085	0.00070125	0.001581844	10	5	500	0.5	0.007957747	200
6	0.35	0.325	0.0105	0.001194375	0.002692983	10	6	500	0.6	0.009549297	200
7	0.4	0.375	0.0125	0.001875	0.004225572	10	7	500	0.7	0.011140846	200
8	0.45	0.425	0.0145	0.002773125	0.006246465	10	8	500	0.8	0.012732395	200
9	0.5	0.475	0.0165	0.00391875	0.00882231	10	9	500	0.9	0.014323945	200
10	0.55	0.525	0.0185	0.005341875	0.012019533	10	10	500	1	0.015915494	200
11	0.6	0.575	0.0205	0.0070725	0.015904325	10	11	500	1.1	0.017507044	200
12	0.65	0.625	0.0225	0.009140625	0.020542622	10	12	500	1.2	0.019098593	200
13	0.7	0.675	0.0245	0.01157625	0.026000092	10	13	500	1.3	0.020690143	200
14	0.75	0.725	0.0265	0.014409375	0.032342117	10	14	500	1.4	0.022281692	200
15	0.8	0.775	0.0285	0.01767	0.03963378	10	15	500	1.5	0.023873241	200
16	0.85	0.825	0.0305	0.021388125	0.047939848	10	16	500	1.6	0.025464791	200
17	0.9	0.875	0.0325	0.02559375	0.057324756	10	17	500	1.7	0.02705634	200
18	0.95	0.925	0.0345	0.030316875	0.067852595	10	18	500	1.8	0.02864789	200
19	1	0.975	0.0365	0.0355875	0.079587094	10	19	500	1.9	0.030239439	200
20	1.05	1.025	0.0385	0.041435625	0.092591604	10	20	500	2	0.031830989	200

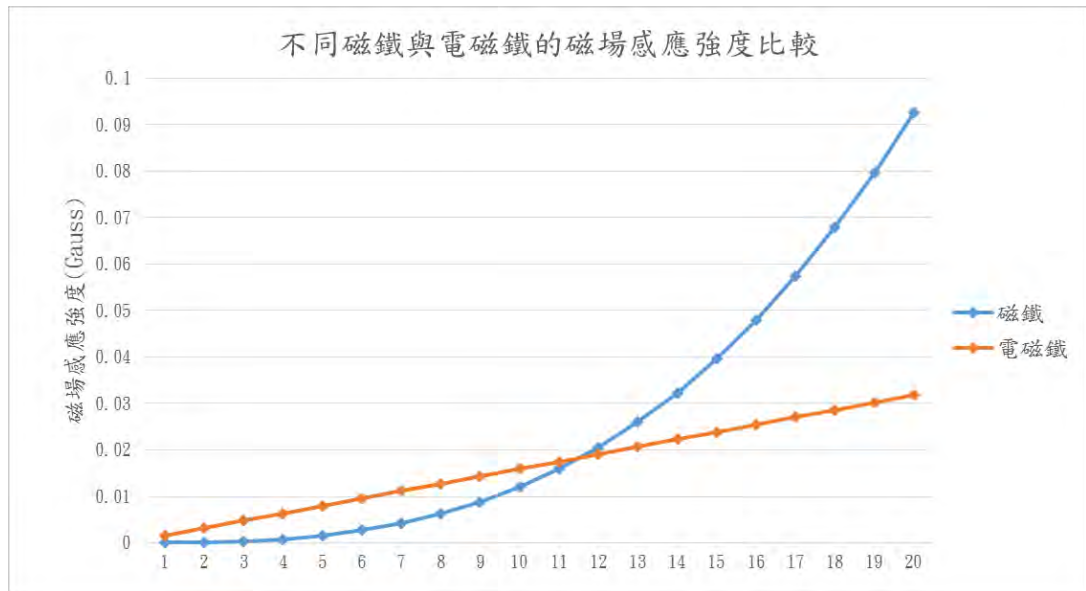


圖 21 不同磁鐵與電磁鐵的磁場感應強度比較

根據公式(3)，電磁鐵的輸入電流、線圈面積與產生之磁場感應強度呈正相關，於是若要減少線圈體積，就必須要增加線圈電流才可得到相同的磁場感應強度，此亦造成電流過大及耗電的問題。如表 4 中設銅線內電阻為 2 歐姆，代表電磁鐵運作時將會消耗 200W 的電力，而永久磁鐵只需花費馬達旋轉所耗的電，小型 RE 540 馬達只需使用 1.8W 的電力，即可達成 40Hz 的交流磁場訊號，由此可見磁鐵與電磁鐵產生交流磁場源的耗電功率相差甚大。

表 4 的藍色部分為不同體積的磁鐵，在此取不同長、寬、厚的矩形永久鈷鐵硼磁鐵(N52)[20]來進行比較；而黃色部分為不同的電磁鐵，在此設定輸入電流為 10A，並取不同線圈面積的電磁鐵來進行比較。由此可發現磁鐵的體積比電磁鐵的體積小相當多，但其所產生的磁場感應強度卻相差不多。圖 21 中可看出編號 12 的磁鐵與電磁鐵的磁場感應強度大致相同，但對應表 4 中的體積資訊後卻發現相差懸殊，永久磁鐵只有 0.009140625 立方公尺，而電磁鐵卻有 1.2 立方公尺，充分展現使用永久磁鐵作為交流磁場源的優勢。

### (3) 設置一個包含雙交流磁場源的定位參考點

本研究為了要達成利用單一參考點進行定位，已提出隨時間改變場型的交流磁場的概念，欲由得知 $(r, \theta, \varphi)$ 三樣資訊，來求出物體在空間中的位置。又一個磁場源只能得知一個平面的角度資訊，所以要得到 $\theta$ 及 $\varphi$ 兩個角度資訊，必須設置雙交流磁場源才能達成，至於 $r$ 的部分則可彈性選擇要以哪個磁場源所產生的磁場感應強度訊號來計算距離。

另外，為了利用兩個訊號的相位差來求出物體的角度，必須要先定義 $0^\circ$ ，於是本研究將會在參考點的基座上放置一個磁阻感測器，該磁阻感測器設置的目的為紀錄 $\theta = 0^\circ$ 的訊號相位，才能由相位差的概念求出與定義之 $0^\circ$ 相差的角度，進而達成定位的目的。此定位參考點的示意圖如下圖 22：

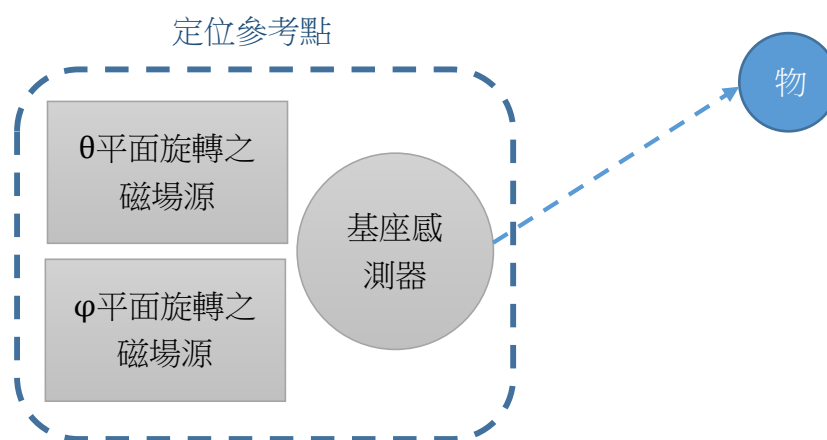


圖 22 定位參考點示意圖

### (4) 利用分頻多工及特定點之離散傅立葉轉換同時處理兩個磁場源的訊號

為同時得到物體相對於參考點之 $\theta$ 以及 $\varphi$ 的角度，本研究提出了利用分頻多工及特定點之離散傅立葉轉換同時處理兩個磁場源的訊號之方案。兩個磁場源利用了分頻多工的技术，以不同頻率的磁極變換頻率產生兩個不同的交流磁場，之後再利用特定點之離散傅立葉轉換將訊號由時域轉至頻域，搜尋能量集中的兩個頻率，即為分別量測 $\theta$ 以及 $\varphi$ 角度的磁場源。至於使用「特定點」之離散傅立葉轉換的意思是只針對感興趣的，或特定的頻率區域做轉換，而不需將頻域上每個頻率的能量計算出來；舉

例來說，若磁場源的磁極轉換頻率為30Hz，則只需對 $30 \pm 5\text{Hz}$  頻率區間進行轉換即可，使運算的時間大幅減短。實作過程中，利用背景探討所討論的公式(11)進行離散傅立葉轉換時，只提供需要運算的 $k$ 值範圍，便能避免進行許多不必要的運算，如下圖 23 中只設定將 $k = 20$ 到30的頻譜係數計算出來，即可找出能量集中的主要頻率。

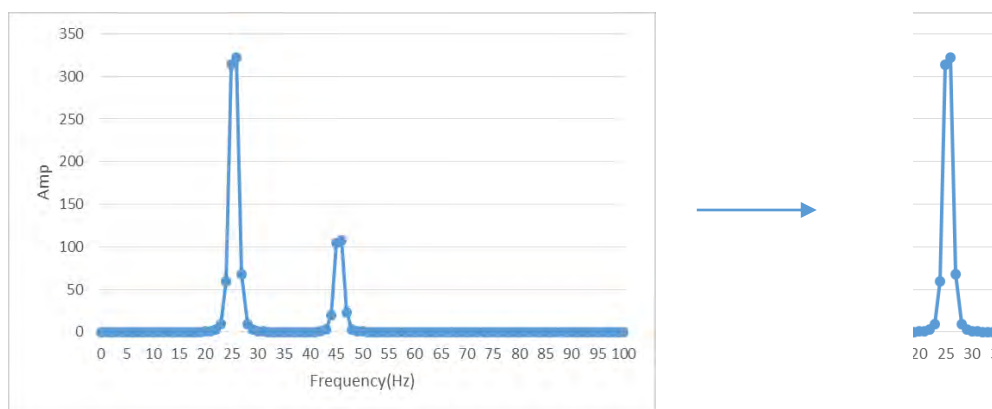


圖 23 特定點之離散傅立葉轉換

#### (5) 藉物體的訊號之差動磁場強度及與參考點之訊號的相位差求出 $(r, \theta, \varphi)$

根據公式(3)，物體與參考點的距離可由量測之磁場訊號之差動磁場強度得知，其關係為磁場感應強度與距離的三次方成反比；而 $\theta$ 及 $\varphi$ 角則依先前提出之方案，產生會隨時間改變場型的交流磁場，進而由物體量測之訊號以及參考點上基準感測器所量測之訊號的相位差來計算出角度，如此一來， $(r, \theta, \varphi)$ 便能被完整求出，之後可再利用背景探討中的公式(7)至公式(9)來換算出物體的 $(x, y, z)$ 座標，達成定位。

本研究將上述提出之多項解決方案合併，建構出下頁圖 24 的以分頻多工及交流差動磁場強度為基礎之單一參考點定位系統流程圖。此流程圖結合時變場型的交流磁場的概念，並利用分頻多工及特定點之離散傅立葉轉換，同時處理來自參考點上兩個磁場源的訊號，並計算與參考點距離以及角度，以求得物體在空間中的實際位置，進而達到定位的目的。

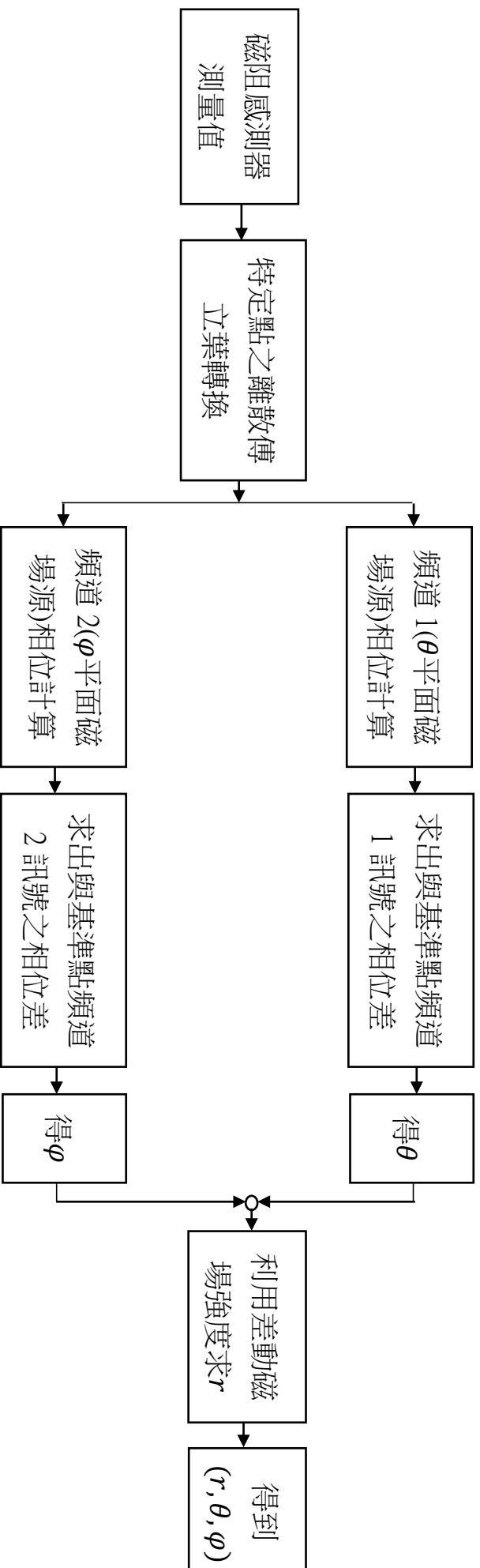


圖 24 本研究提出之定位系統流程圖

### (三) 進行實作

本研究實作方面將分成兩個程序，如下圖 25：

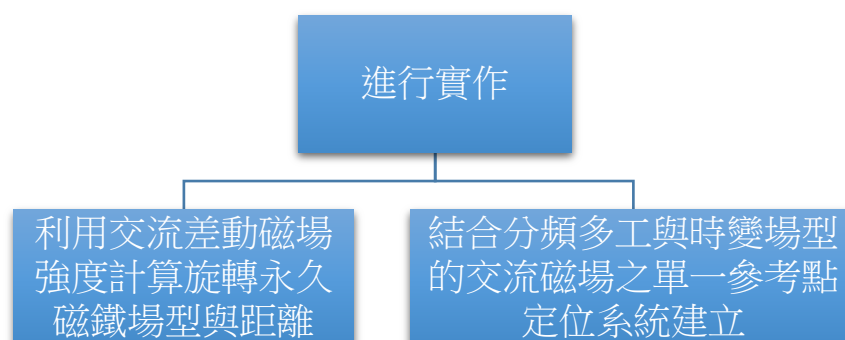


圖 25 實作程序圖

進行實作的第一個部分將先利用交流差動磁場強度量測並記錄旋轉永久磁鐵的場型，藉此確定何種磁場強度的資訊可作為距離計算的依據，之後再由此進行距離計算。

第二部分進行實作時，先利用分頻多工及特定點之離散傅立葉轉換的訊號處理，同時量測兩個磁場源的磁場強度訊號，並再利用先前提出的方案以及第一部分實作的結果，求出  $(r, \theta, \varphi)$  座標，達到定位的目的。如此便能建立本研究提出之單一參考點的定位系統。

經上述實作，可驗證本研究提出之定位系統的可行性，並且得知此定位系統的穩定性以及準確性，在討論時便可評估其應用於微型無人飛行器上的可行性，確認本研究提出之定位系統所需之運算是否可在無人控制裝置上執行。



## 1. 旋轉永久磁鐵場型與距離計算

此部分將針對下列兩個問題進行探討：

- (1) 藉由旋轉的永久磁鐵產生的交流磁場訊號可否計算出磁場源與物體的距離。
- (2) 實際利用差動磁場強度計算與磁場源的距離是否可行。

為探討上述兩個問題，將分成以下兩個實驗進行實作。

### 實驗一、旋轉磁鐵場型的量測

在進行此實驗時所需使用之研究設備與器材如下表 5：

表 5 實驗一研究設備與器材

研究設備與器材	
實驗一	測試平面一個；永久鈷鐵硼磁鐵(N35) 40mm*25mm*3mm 一個；直流馬達(RE 540)一個；馬達固定座一個；磁阻感測器(HMC1022)兩個；示波器(Tektronix TPS-2022B)兩台；電源供應器(GW Instek GPC-30300)一台； Origin 9.1 軟體(試用版)一套

下圖 26 至圖 29 為本研究所定義之實驗環境，以及磁場源和感測器的實際圖。

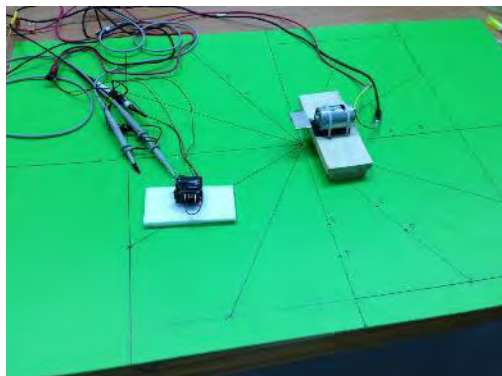


圖 26 量測差動磁場強度所定義之測試平面

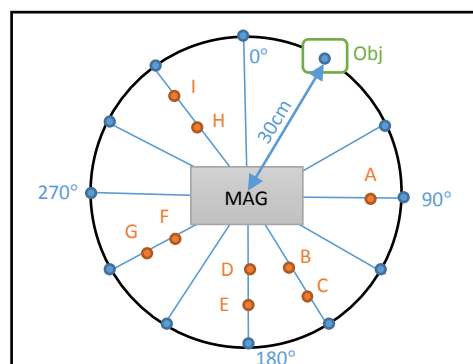


圖 27 量測差動磁場強度之測試平面標點示意圖

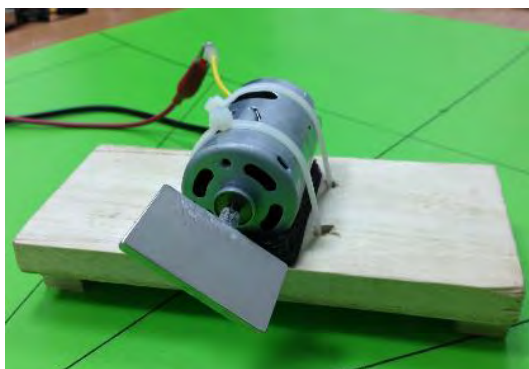


圖 28 旋轉永久鈷鐵硼磁鐵(N35)磁場源

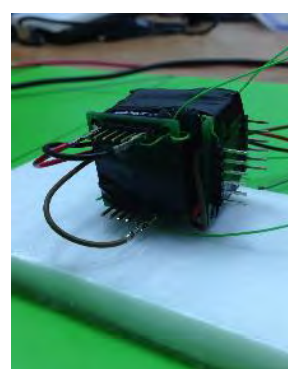


圖 29 磁阻感測器



圖 26 及圖 27 為本研究為量測旋轉永久磁鐵的場型所設置的環境，將使用此測試平面做旋轉永久磁鐵的場型測定。根據圖 27，以上方為 0 度，順時針每隔 30 度依序標點，並定義 0 度與 180 度的連線為 Y 軸、90 度與 270 度的連線為 X 軸，而垂直該平面的則為 Z 軸。

圖 28 為本研究自製的旋轉永久鈷鐵硼磁鐵(N35)磁場源，主要利用一馬達，其軸上卡入 Y 型端子增加永久磁鐵黏接的表面積，再利用強力膠將 40mm\*25mm\*3mm 的永久磁鐵固定在馬達轉軸上，達成自製的旋轉永久磁鐵磁場源。未來可再針對固定磁鐵在馬達上的裝置進行設計，使磁鐵無法從馬達上脫落，轉動時所造成的震動也會更少。

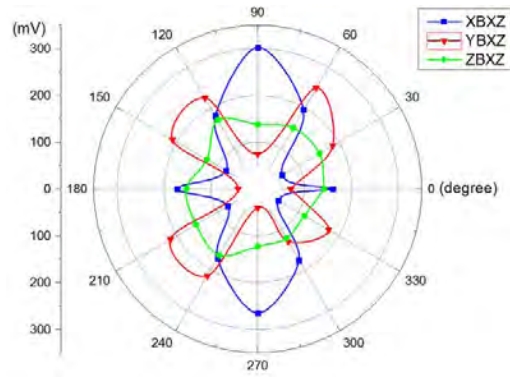
圖 29 為本研究自製的三軸差動磁場強度感測器，主要使用二軸磁阻感測器(型號 HMC1022)所製，此感測器會將感應到之磁場強度轉換成電壓輸出，實作時便可利用示波器來監測感測器的輸出電壓變化，進而求得其磁場大小比較。

### **實驗目標**

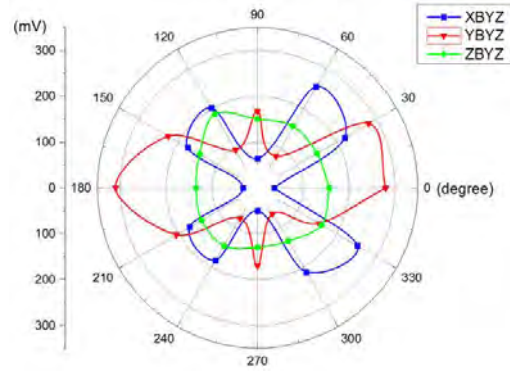
利用圖 26 的測試平面，測量同一平面上與磁場源等距的不同點，並將感測器三軸方向的差動磁場強度數據，整理成旋轉磁鐵的場型圖。由此找出等距離下，各角度所量測到的差動磁場強度大致相同的一個資訊(即場型近似圓形)，供距離計算時使用。

### **實驗過程**

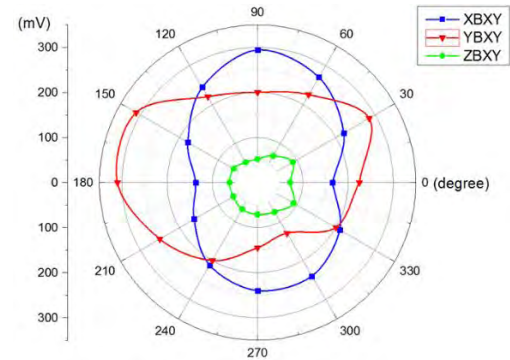
進行量測時，將圖 28 的磁場源裝置放置在測試平面的中心，並將圖 29 的自製三軸磁場強度感測器分別放置在與磁場源等距 30cm 的圓周上(XY 平面)，每隔 30 度進行一次磁場強度資訊的蒐集，便可把該平面上與磁場源等距的點之三軸磁場強度資訊記錄下來；接著將中心點上的馬達以兩種不同方式旋轉，重複上述量測步驟，即可得到磁場源以三個不同方式旋轉的場型圖。最後將各種旋轉方式的三軸磁場強度資訊平方相加開根號得到純量後再繪製一次場型圖，結果如下圖 30。



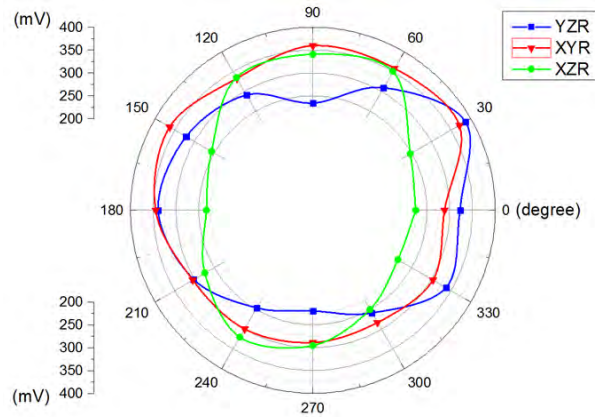
(a) 與在 XZ 平面旋轉的磁場源等距之各角度所量測的三軸差動磁場強度資訊



(b) 與在 YZ 平面旋轉的磁場源等距之各角度所量測的三軸差動磁場強度資訊



(c) 與在 XY 平面旋轉的磁場源等距之各角度所量測的三軸差動磁場強度資訊



(d) 三種旋轉方式下與磁場源等距之各角度所量測之差動磁場強度純量資訊

圖 30 由差動磁場強度資訊整合之場型圖

上圖 30 (a)至(c)的永久磁鐵以三種不同情形旋轉(在 XZ 平面、YZ 平面及 XY 平面)，並用感測器在各個角度的等距離處，量測三個軸(X、Y、Z)方向的差動磁場強度。此依磁阻感測器(型號 HMC1022)已將磁場強度資訊轉換為電壓資訊，便於示波器監測磁場強度訊號。

由圖 30 更可分析出，永久鈷鐵硼磁鐵於三種不同的平面(在 XZ 平面、YZ 平面及 XY 平面)進行旋轉時，磁阻感測器的 X 軸以及 Y 軸的場型並沒有辦法作為計算距離的依據，而 Z 軸在與磁場源等距時所量測到的差動磁場強度幾乎相同，其場型接近圓形，但是其有兩個缺點：

- i. 改變仰角而在三維空間中進行量測時場型即不為圓形
- ii. 物體的 Z 軸若要一直與慣性座標系的 Z 軸吻合則造成些許不便利性

再看到圖 30 的(d)，可發現不管以何種旋轉方式，場型皆近於圓形，但是由此場型亦可發現旋轉磁鐵在轉動時有死角，即在旋轉磁鐵的側邊所量測到的訊號會衰減，而只在旋轉面的 $\pm 45^\circ$ 有較佳的定位效果，於是在進行實作時會考慮此特性，並做出最佳定位範圍的定義。

經實驗一，已回答此部分一開始所定義需探討的問題，發現使用三軸的磁場強度平方相加開根號所得的純量資訊較可作為距離量測的依據。

## 實驗二、以差動磁場強度計算距離

在此實驗所需使用的實驗設備與器材大致上與實驗一相同，但是多了一個測量物體所在高度的實驗裝置，如下圖 31。



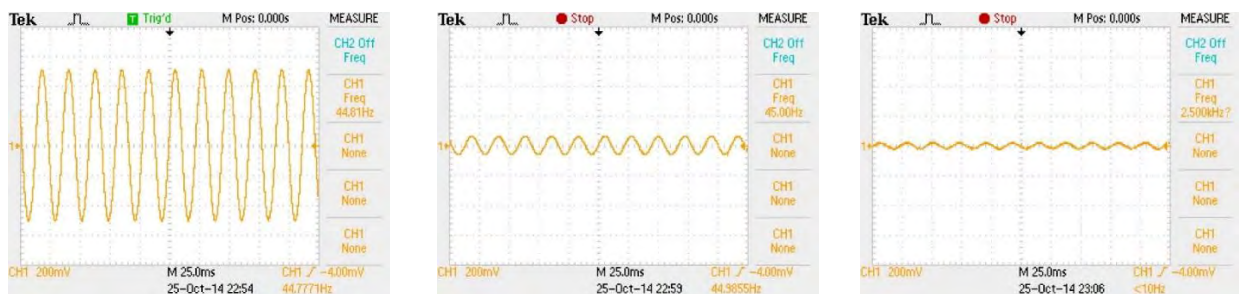
圖 31 本研究測量物體所在高度的實驗裝置

## 實驗目標

藉由感測器所量測到的差動磁場強度計算磁場源與其的距離。首先將磁場源固定在一處，並移動感測器至事先設定不同距離處標定之位置上，蒐集感測器所輸出的磁場強度訊號，並找出距離與差動磁場強度的關係。(本實驗使用 Z 軸進行測量，因根據實驗一，其在實驗設定下的場型可為圓形，於是效果亦同利用純量進行計算的距離。

## 實驗過程

利用圖 31 實驗裝置在各高度位置所量測到的磁場強度訊號如下圖 32 所示。



(a) 高度距磁場源 20cm 處 (b) 高度距磁場源 40cm 處 (c) 高度距磁場源 60cm 處

圖 32 不同高度量測之磁場強度訊號

根據公式(3)，差動磁場強度與距離的三次方成反比，由圖 32 中可得(a)之差動磁場強度約為 1V，(b)之差動磁場強度約為 120mV，而(c)之差動磁場強度約為 40mV，符合公式(3)之差動磁場強度與距離的三次方成反比。

接下來則是利用圖 26 的測量平面進行距離的計算，主要量測圖 27 的測量平面示意圖中，定義之標點 A 到 I 點的磁場強度訊號。下圖 33 及圖 34 以標點 F 與標點 G 所量測到的磁場強度訊號為例。(只需看黃色的訊號—Z 軸訊號)

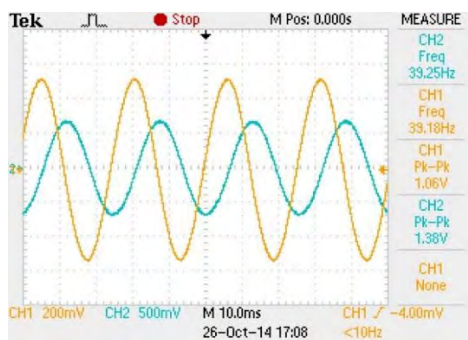


圖 33 標點 F 量測到的磁場強度訊號

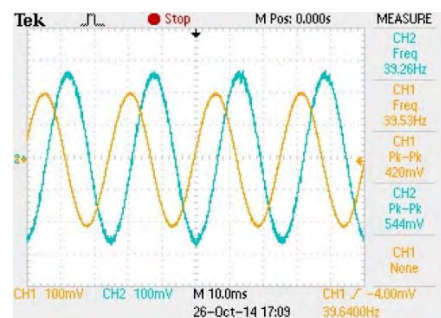


圖 34 標點 G 所量測到的磁場強度訊號

本研究先利用標點 D 所量測到的資訊推算差動磁場強度係數，並再進行量測。圖 33 中可得在標點 F 時 Z 軸的差動磁場強度為 1060mV，而根據圖 34，標點 G 時 Z 軸的差動磁場強度為 420mV，用此便可代入公式(3)中計算磁場源與物體的距離。下表 6 為計算之距離與實際距離的誤差統計表。

表 6 物體在不同標點計算距離與實際距離誤差統計表

標點	A	B	C	E	F	G	H	I
理想距離 (cm)	20	15	20	20	15	20	15	20
峰對峰值 (mV)	568	1240	540	420	1060	420	1340	430
差動磁場 強度係數	3948750	3948750	3948750	3948750	3948750	3948750	3948750	3948750
計算距離	19.0855	14.7122	19.4098	21.1058	15.5018	21.1058	14.3367	20.9409
誤差(cm)	-0.9145	-0.2878	-0.5902	1.1058	0.5018	1.1058	-0.6633	0.9409

由表 6 中可發現，計算距離與實際距離的誤差約在±1公分以內，而此誤差包含了人為操縱實驗時的誤差(包含標點、擺設物體、磁場源偏移等……)。目前計算距離造成的誤差尚可符合定位的需求，而此精準度的提升在未來也有改進的空間(降低人為實驗操作誤差可大幅降低誤差的產生)。

在進行實作的第一部分主要完成了兩項實驗。**實驗一**藉由量測旋轉永久磁鐵的場型，了解要如何計算距離。經過多個旋轉方式以及在同平面同距離不同角度下的差動磁場強度量測值分析，歸納出其三軸的差動磁場強度純量之場型接近一圓形，於是在計算距離時便會先將三軸的差動磁場強度資訊轉換為純量後再進行計算。**實驗二**主要是藉由量測之差動磁場強度計算物體與磁場源的距離，而計算過程便是利用公式(3)。透過計算多個標點的距離，可與其實際距離進行比較並求得計算距離的誤差資訊，由此結果可看出計算距離的誤差約在±1公分之內，尚可符合定位的需求。結束了利用一個磁場源進行測試的實作，接下來便是利用此二實驗的結果，協助建立本研究所提出之定位系統。

## 2. 結合分頻多工與時變場型的交流磁場之單一參考點定位系統的建立

此部分將針對下列兩個問題進行探討：

- (1) 利用特定點之離散傅立葉轉換是否可以有效分離出不同頻率的訊號
- (2) 結合分頻多工與時變場型的交流磁場之單一參考點定位系統是否可行。

為探討上述兩問題，將分成以下兩個實驗進行實作。

### 實驗三、分頻多工的數位訊號處理實作

以下將進行分頻多工的數位訊號處理實作，主要使用背景探討時所討論的特定點之離散傅立葉轉換來分離不同頻率的訊號。

#### 實驗目標

本研究將根據以下實驗，探討特定點之離散傅立葉轉換應用於分離多個頻率訊號的可行性，並且觀察其有無使用窗口函數所得結果的差別，進而分析出本研究提出之定位系統中，對兩個旋轉平面旋轉的磁場源之磁極變化頻率差應大於多少個頻率，這對本研究之定位系統來說為重要的資訊。

#### 實驗過程

實驗過程採用產生模擬訊號的方式，先產生兩個不同相位(45°, 25°)、頻率(25.52Hz, 45.52Hz)以及振幅(1.5V, 0.5V)的正弦波，並將其相加，再藉由特定點之離散傅立葉轉換來將此訊號由時域轉至頻域，並從頻域觀察其訊號分離的情形是否符合需求。

以下為執行特定點之離散傅立葉轉換的虛擬原始碼：

```
for(k=lval; k<hval; k++) {
    for(n=0; n<N; n++) {
        ReX[k] = ReX[k] + x[n]*cos(2*pi*k*n/N) ;
        ImX[k] = ImX[k] - x[n]*sin(2*pi*k*n/N) ;
    }
}
```

其中 X[k]為頻域係數序列，Re 代表其實部，Im 代表其虛部。lval 以及 hval 分別代表欲搜尋頻率的上界及下界。x[n]為時域序列，N 為取樣點數。



上頁執行特定點之離散傅立葉轉換的虛擬原始碼為利用背景探討中的公式(11)進行轉換，而此種轉換方式被稱之為”特定點”的原因在於其僅計算感興趣之頻率區間，也就是利用 lval 以及 hval 兩變數做此區間的定義。

有了此轉換的方式，便能來針對有無使用窗口函數來進行比較。由本研究提出之數位訊號處理方案，將會對時域的訊號乘上一窗口函數後再進行特定點之離散傅立葉轉換，下圖 35 即為該模擬訊號在時域上數值(已進行窗口運算)以及圖 36 為該訊號轉換至頻域後，各頻率佔有的能量數值。

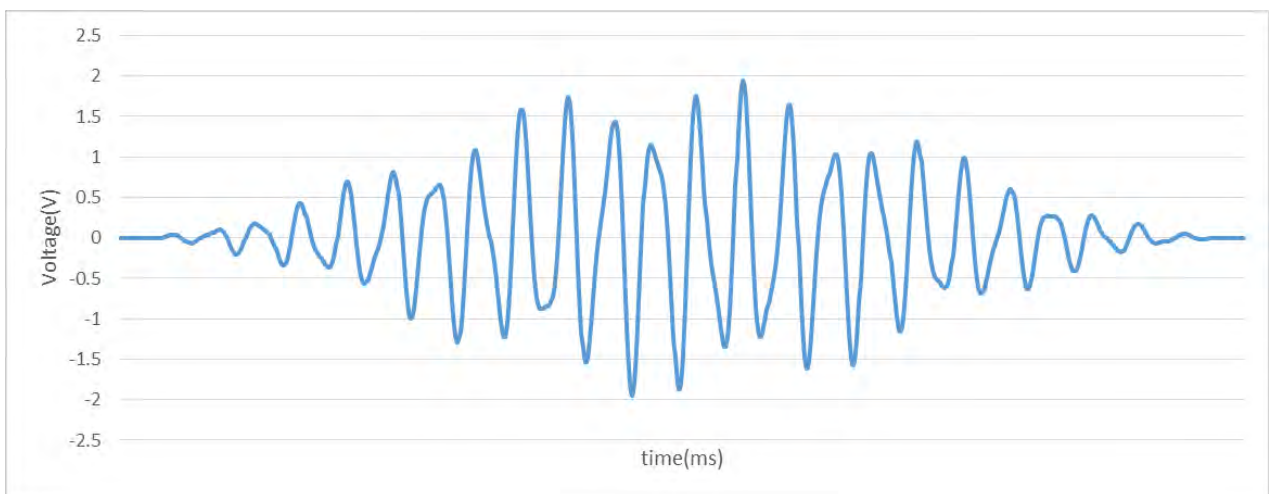


圖 35 模擬訊號經窗口運算後在時域上的訊號圖

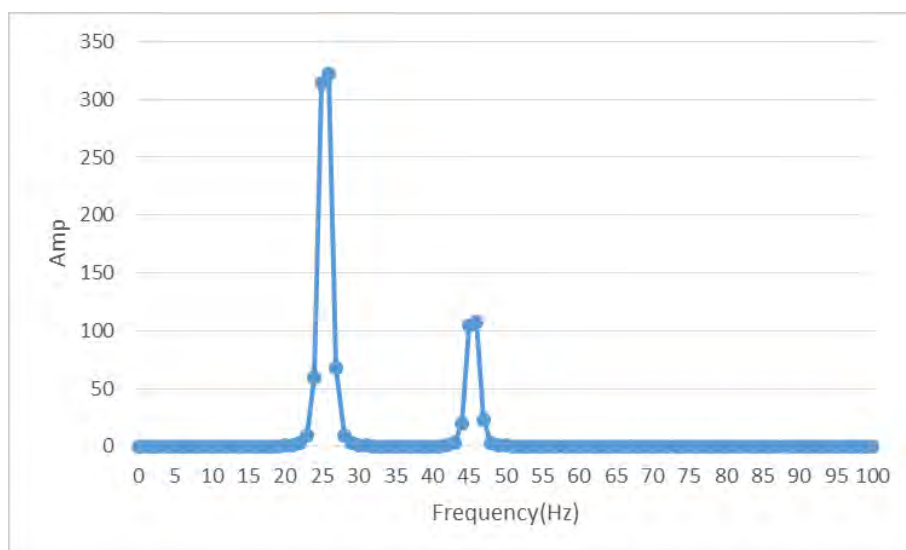


圖 36 訊號經窗口運算再進行離散傅立葉轉換所得結果

由圖 36 中可看出，該訊號可完美分離出圖 35 中的頻率成分，雖使用窗口函數所得結果沒辦法與理想狀況下只有單一頻率點具有能量，而是分散在附近

三到四個頻率點上，但其他頻率點的能量數值(頻率序列之實部與虛部的平方相加開根號)趨近於 0，已可滿足本研究之需求，可準確分離出正確的頻率值。

本研究在此利用背景探討中的公式(13)至公式(17)，由頻域的能量數值回推出時域上該頻率成分的訊號之振幅、頻率以及相位等資訊，所得結果如下：

**頻率 1** 振幅：1.5000019 頻率：25.520021 相位：44.995567

**頻率 2** 振幅：0.5000032 頻率：45.519802 相位：25.032990

此處計算出的數值與原先設定的數值可說是完全一致，證明了此種特定點之離散傅立葉轉換針對分離不同頻率訊號的可行性。

下圖 37 為沒有使用窗口函數而直接進行轉換所得之結果，可與圖 36 做比較。

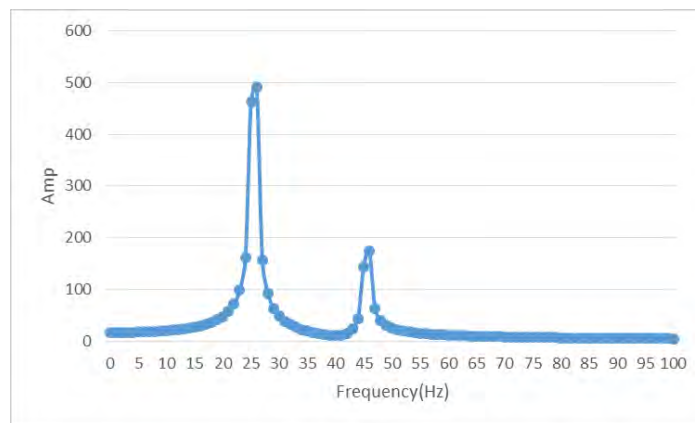


圖 37 訊號未經窗口運算進行離散傅立葉轉換所得結果

圖 37 中可發現，主要頻率的能量被分散至兩旁的頻率之中，當主訊號之振幅偏小時，則無法分辨訊號的頻率，此原因為離散傅立葉轉換的成立條件為取樣之訊號的前端與後端必須是一致性的(coherence)，否則會產生出新的頻率，造成主要頻率的能量被分散到其他頻率。

經此實作後，以了解使用窗口函數的必要性，以及將經窗口函數運算的訊號進行特定點之離散傅立葉轉換的可行性，在進行系統建立時便依循此方法來分離出兩個磁場源(對兩個旋轉平面旋轉)的訊號，達成分頻多工，並再經計算後得到精確的位置資訊。



## 實驗四、結合分頻多工與時變場型的交流磁場之單一參考點定位系統的建立

在進行此實驗時所需使用之研究設備與器材如下表 7：

表 7 實驗四研究設備與器材

研究設備與器材	
實驗四	磁場源固定座兩個；永久鈷鐵硼磁鐵(N35) 40mm*25mm*3mm 兩個；直流馬達(RE 540)兩個；三軸磁阻感測器模組(HMC1053)一個；示波器(Tektronix TPS-2022B)兩台；電源供應器(GW Instek GPC-30300)一台；FSK 模組一個；NRF24L01 資料傳輸模組一個；STM32F407 discovery board 一個；杜邦線 一網；Keil uVision4 軟體一套；Hyper Terminal 軟體一套；電腦兩台

### 實驗目標

利用時變場型求角度的特殊演算法，將單一參考點的定位系統建立出來。首先利用單一磁場源進行 XY 平面的定位，並且放置不同的障礙物，確認其定位時沒有多重路徑干擾；再根據方案所提出之參考點的設計，使用雙磁場源進行 XYZ 空間的定位，並針對單一參考點之定位系統的穩定性以及準確性作探討。

### 實驗過程

本研究先建構出一個被定位物體的裝置，其示意圖如下圖 38：

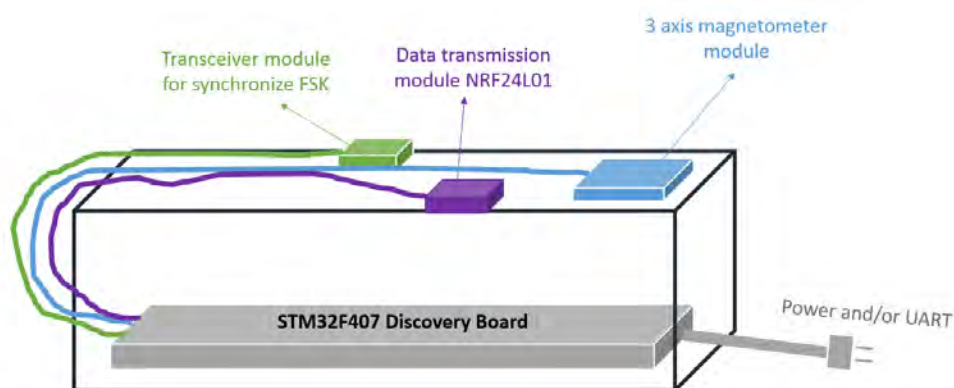


圖 38 被定位物體裝置示意圖

為了求得兩物體的相對角度，本研究提出了時變場型的概念，利用同一時間下兩物體量測到訊號的相位差，計算出其相對角度。但是此演算法可執行的

條件為必須要在同一時間下，所以兩物體對訊號取樣的時間必須同步，於是本研究在實際建立被定位物體裝置時，裝設了 FSK 同步模組。

再者，為將量測之相位差求出，本研究在此裝設了資料傳輸模組 NRF24L01，將三軸磁阻感測器模組所量測之資訊傳至其中一台裝置，再進行運算。實驗過程中將使用 UART 來將資料顯示於電腦上，方便除錯。下圖 39 為被定位物體裝置的實際圖。

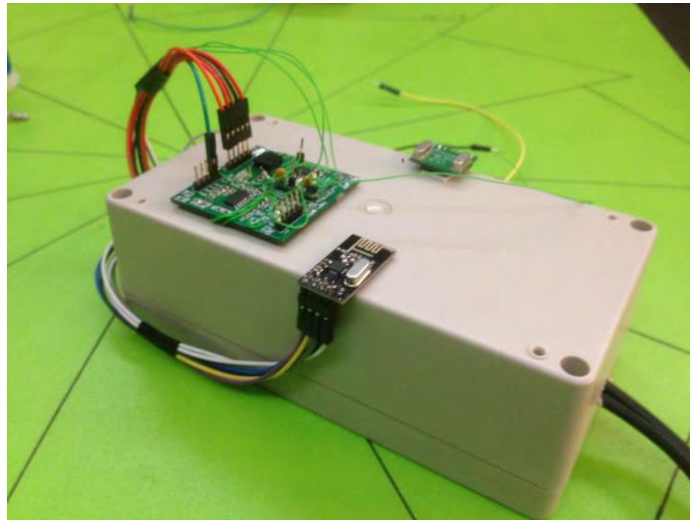


圖 39 被定位物體裝置實際圖

由此以及包含雙磁場源的單一參考點，如下圖 40，便能進行定位系統的穩定性以及準確性測試。

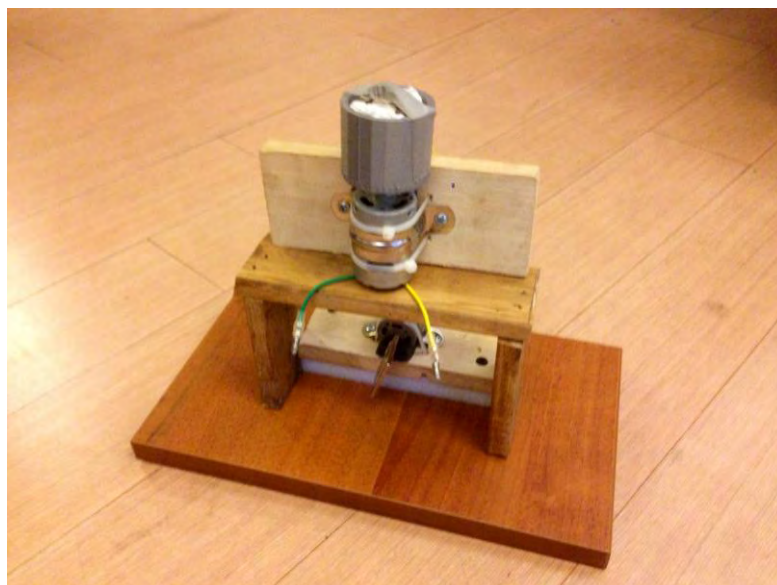


圖 40 包含雙磁場源的單一參考點

下圖 41 為本研究針對 XY 平面一點進行量測時，取得之位置資訊。

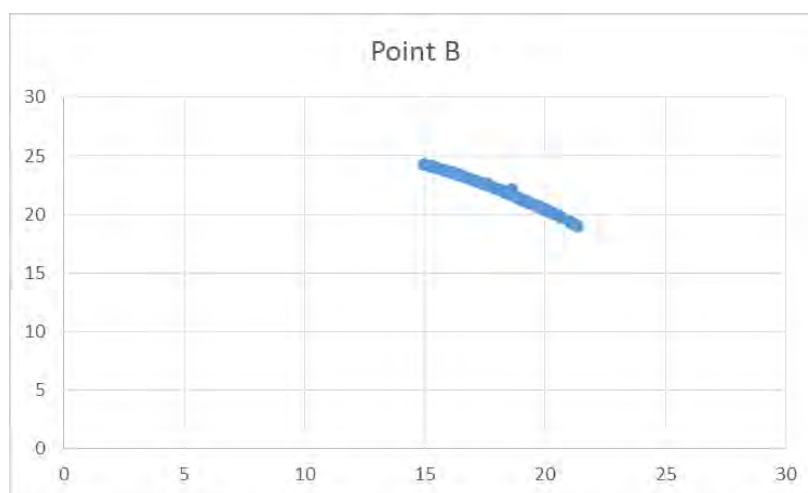
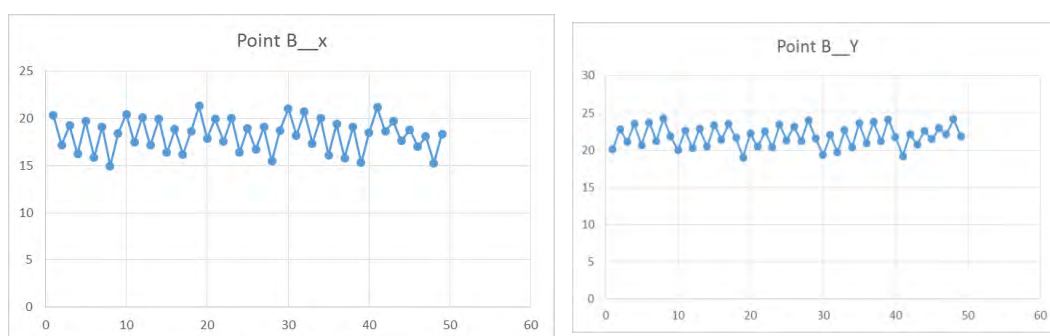


圖 41 對 XY 平面上一點進行位置量測所得之結果

由圖 41 可發現其所得之位置資訊有些許的漂移，而此飄移呈現一個弧形，亦代表計算之角度資訊有這個區間內的誤差。造成此現象的原因為磁場源馬達的轉速不一，使得訊號的頻率持續在改變，而計算出之角度會在一個範圍內有一定的誤差。為說明並證明此情形，下圖 42 顯示磁阻感測器 X 軸以及 Y 軸所量測到的磁場感應強度訊號。



(a) 磁阻感測器 X 軸方向量測之訊號 (b) 磁阻感測器 Y 軸方向量測之訊號

圖 42 磁阻感測器各軸量測之磁場感應強度訊號

可明顯的看出磁阻感測器各軸量測到的訊號有抖動的情形，此因馬達轉速不一以及馬達振動所造成的。要減少此情況對定位準確度的影響，必須取動態的平均，下圖 43 為取動態平均後所得的位置資訊。

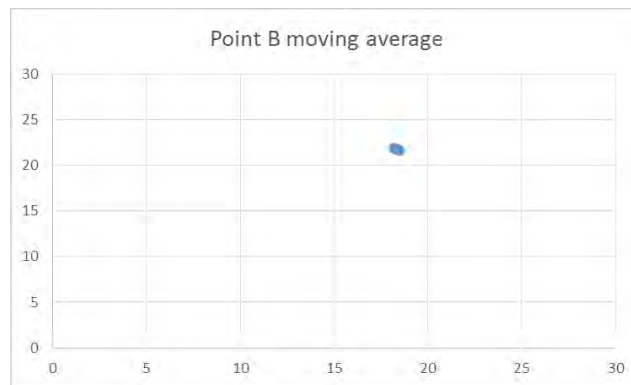
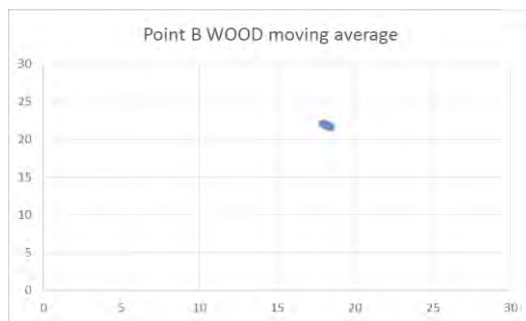


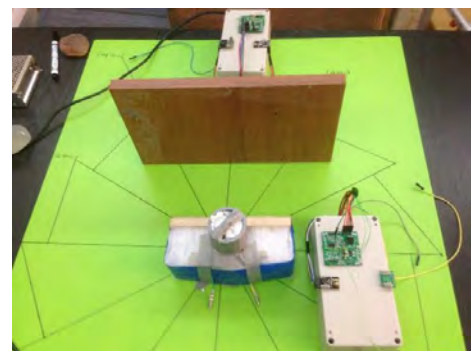
圖 43 取動態平均後的位置資訊

發現取動態平均後位置資訊收斂至一點，證明了本定位系統的穩定性。

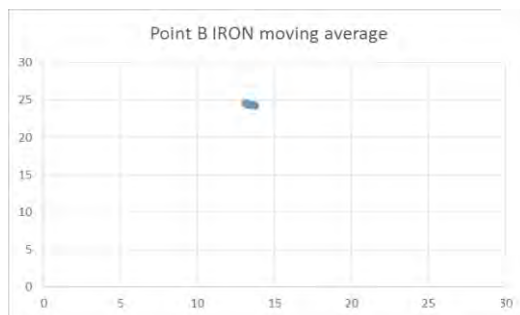
之後，在 XY 平面上對同一點進行位置的量測，但是中間分別放置木製的障礙物以及鐵製的障礙物，並觀察其取動態平均後物體位置資訊的收斂情形，如下圖 44。



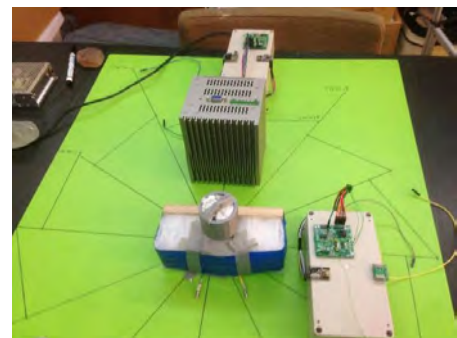
(a) 放置木製障礙物後的位置資訊



(b) 放置之木製障礙物



(c) 放置鐵製障礙物後的位置資訊



(d) 放置之鐵製障礙物

圖 44 擺設不同障礙物進行位置量測並取動態平均後的位置資訊

由圖 44 的(a)及(c)可發現擺設了障礙物之後期收斂情形亦佳，證明了本研究提出之定位系統不受障礙物影響。下表 8 為本研究之定位系統對 XY 平面進行位置量測時的誤差表。

表 8 定位系統對 XY 平面進行位置量測之誤差表

	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5
Actual_x	-26	20	-23	15	5
Actual_y	15	35	40	26	45
Measured_x	-24.28	24.012	-20.84	18.358	8.389
Measured_y	15.094	29.504	37.51	21.761	40.966
Error (cm)	1.722	6.8048	3.2988	5.4078	5.2684

由上表 8 可發現其誤差皆在 10cm 以內，而造成誤差的原因可能為實驗過程中設定位置之量測時造成的，亦或是馬達振動等因素造成，未來可再一一將此誤差減少，達到最好的定位效果。

接下來針對 XYZ 空間的位置進行量測，下表 9 為其誤差表

表 9 定位系統量測空間中 XYZ 位置資訊之誤差表

	Point1	Point2	Point3	Point4	Point5
Actual_x	30	25	30	30	25
Actual_y	25	20	25	15	20
Actual_z	2	5	9	12	16
Measured_x	32.837	27.524	30.052	29.93	23.768
Measured_y	28.609	20.886	24.22	14.771	17.138
Measured_z	4.1452	4.1706	8	10.811	16.782
Error (cm)	5.0669	2.8007	1.2693	1.2128	3.2122

由上表 9 可看出本研究之定位系統針對空間中之 XYZ 位置資訊進行量測時，其誤差亦在 10cm 以內，展現了本研究提出之單一參考點定位系統的可行性，亦表現其對三軸(XYZ)定位的精確性。

經實驗四，已將定位系統的定位步驟皆詳細進行實作，並且由定位多個任意點，得到其定位的結果數據。

在進行實作的第二部分，本研究完成了兩項實驗。**實驗三**藉由使用「特定點之離散傅立葉轉換」，設計並定義一分頻多工之數位訊號處理過程，以供本研究提出之磁場定位系統使用。由**實驗四**，可徹底了解定位的流程，並且得知其定位的精確度。經上述兩項實驗，本研究已建立以分頻多工及交流差動磁場強度為基礎之單一參考點定位系統，之後便分析其穩定性，再評估其應用於微型無人飛行器的控制系統的可行性，更進一步驗證定位系統即時性。



### 三、研究結果與討論

在研究結果與討論的部分，本研究將對以下四點進行討論：

1. 單一參考點磁場定位系統的最大測量範圍
2. 本研究提出之單一參考點定位系統的穩定性
3. 評估本研究提出之單一參考點定位系統應用於微型無人飛行器的可行性
4. 磁場定位對人體的影響

#### (一) 單一參考點磁場定位系統的最大測量範圍

在此要先針對本研究提出之單一參考點磁場定位系統的最大測量範圍進行討論。單一參考點的定位系統可由旋轉的永久磁鐵以及電磁鐵作為磁場源的兩種方式呈現，下圖 45 為永久磁鐵作為磁場源時的定位範圍定義。

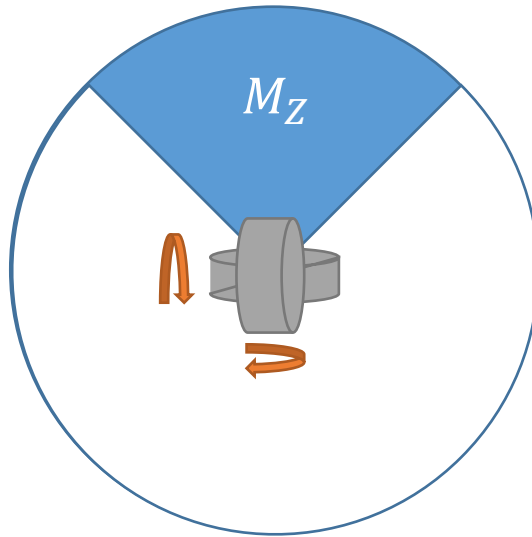


圖 45 永久磁鐵作為磁場源時的定位範圍 $M_Z$ 定義示意圖

上圖 45 為二維平面，但本研究提出之定位系統可量測三維空間中的物體，所以亦須考慮三維空間中的定位範圍。再者，實驗一中說明了永久磁鐵具有誤差區域，即在該區域下無法得到準確的位置座標，於是由此可推得 $M_Z$ 的計算公式，如下公式(21)。

$$M_Z = \frac{d^3}{3} \pi (2 - \sqrt{2}) \quad (21)$$

公式(21)中 $d$ 代表磁場源的最大測量距離，藍色區域為其定位範圍 $M_Z$ 。

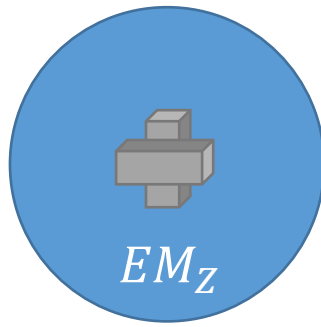


圖 46 電磁鐵作為磁場源時的定位範圍 $EM_Z$ 定義示意圖

由上圖 46，可將電磁鐵的定位範圍 $EM_Z$ 由以下公式(22)來進行描述。(d為最大測量距離)

$$EM_Z = \frac{4d^3}{3} \pi \quad (22)$$

在此使用表 4 編號的磁鐵及電磁鐵，計算其最大測量範圍( $m^3$ )並求出與該磁場源體積( $m^3$ )與所需電流(A)乘積的比值 $R_p$ ，進而求得何種磁場源的定位效益較高，如下表 10。

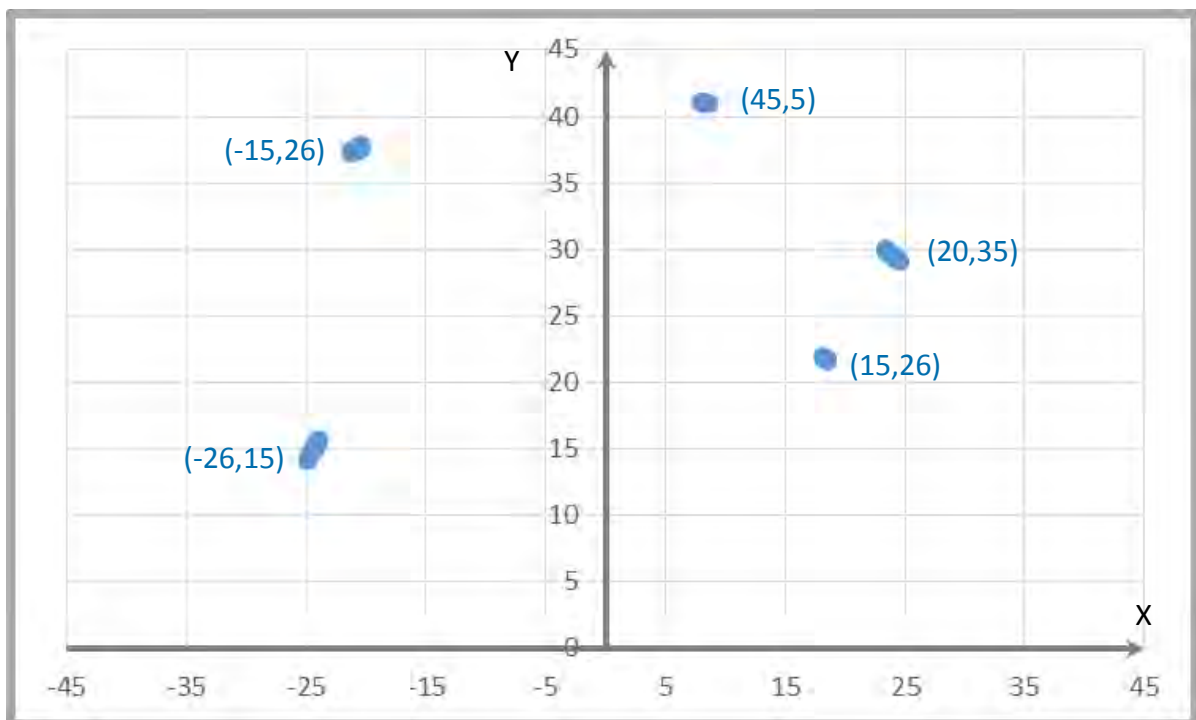
表 10 不同的磁鐵與電磁鐵之定位效益比值 $R_p$ 比較表

編號	磁鐵體積*電流	磁鐵定位範圍	$R_p$ 值	電磁鐵體積*電流	電磁鐵定位範圍	$R_p$ 值
1	0.00000675	43.21336	3200989.63	1	55761.4	13940.35
2	0.000084375	542.7273	3216161.778	2	110850.4	13856.3
3	0.0002835	1831.704	3230518.519	3	166093.2	13841.1
4	0.000658125	4207.545	3196615.385	4	222665.1	13916.57
5	0.00126225	8063.135	3193953.258	5	278261.9	13913.1
6	0.002149875	13756.73	3199425.548	6	333038.1	13876.59
7	0.003375	21646.59	3206902.222	7	389388.6	13906.74
8	0.004991625	31834.24	3188765.182	8	443273.8	13852.31
9	0.00705375	45124.25	3198600.035	9	498866	13857.39
10	0.009615375	61280.44	3186586.067	10	555647.2	13891.18
11	0.0127305	81372.65	3195972.271	11	613084.7	13933.74
12	0.016453125	105436.8	3204157.265	12	666939.5	13894.57
13	0.02083725	133165.4	3195368.871	13	719967.7	13845.53
14	0.025936875	166142.5	3202824.164	14	775734.6	13852.4
15	0.031806	203276.1	3195562.158	15	834309.4	13905.16
16	0.038498625	246568.2	3202298.783	16	886803.5	13856.3
17	0.04606875	293351.4	3183843.712	17	941454.5	13844.92
18	0.054570375	348224.2	3190597.462	18	998306	13865.36
19	0.0640575	408141.4	3185742.497	19	1052390	13847.24
20	0.074584125	476117.9	3191817.964	20	1108393	13854.91

實作中所使用之磁阻感測器型號 HMC1053，根據此元件的規格，其量測磁場訊號的敏感度可至  $120\mu\text{G}$ [19]，於是可推算得本研究所使用的感測器對不同磁鐵及電磁鐵的磁場源的最大測量距離，將最大測量距離代入公式(21)及公式(22)做運算得到測量範圍。表 10 中將磁場源的最大測量範圍( $m^3$ )與該磁場源體積( $m^3$ )(需乘上定位時所需的磁場源裝置個數)和所需電流(A)乘積的比值 $R_p$ 列出，可發現磁鐵的 $R_p$ 值為電磁鐵的 230 倍以上，代表永久磁鐵為定位效益較高的磁場源。在此設旋轉的永久磁鐵所需的電流為 1.8A，而電磁鐵所需的電流為 10A。雖電磁鐵定位效益不高，但其控制性高於旋轉的永久磁鐵，未來磁場源的設置可針對此兩優點進行分析。

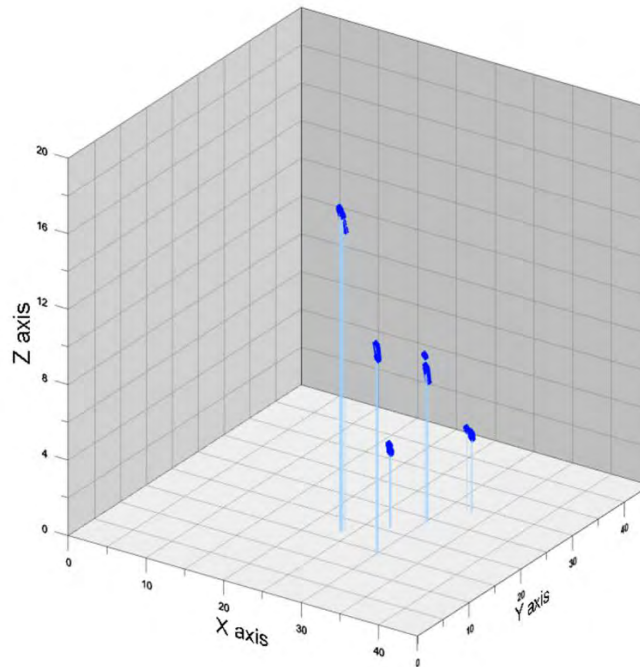
## (二) 本研究提出之單一參考點定位系統的穩定性

由於磁場強度具有相對穩定的特性，因此磁場定位系統相較其他利用偵測訊號強度的定位系統，對於多重路徑干擾及障礙物阻隔有相當的優勢，且測量的誤差並不會被累積。如圖 47 為使用本研究提出之單一參考點定位系統針對 XY 平面以及 XYZ 空間所做的位置資訊量測，此為利用實驗四所蒐集的數據分析之圖表。(圖 47(a) 中之標示點為設定之位置，而圖表上的點為量測之數據)



(a) 定位系統針對XY平面所做的位置量測





(b) 定位系統針對XYZ 空間所做的位置量測

圖 47 使用本研究提出之單一參考點定位系統所量測之位置資訊

由圖 47 可明顯看出利用本研究之定位系統進行位置的量測時，得到的數據皆集中至一點，並不會發散，證明了此定位系統的穩定性，也說明了此定位系統實際應用的可行性。

### (三) 評估本研究提出之單一參考點定位系統應用於微型無人飛行器的可行性

微型無人飛行器受限於電源消耗及體積大小，無法裝置高效能處理器進行定位計算及雜訊處理等複雜的運算，造成微型無人飛行器控制系統在實現上有很大的困難。本研究提出的單一參考點定位系統，可滿足微型無人飛行器控制系統的對於運算量低的需求，更可協助微型飛行器得到三維空間中(XYZ)的位置資訊，達成微型無人飛行器的穩定控制。在此研究中使用之微處理器為 STM32F4 系列的處理器，與目前市面上適用於室內飛行的微型無人飛行器 Crazyflie 2.0 屬相同系列之處理器，而資料傳輸所使用的模組 NRF24L01 亦與 Crazyflie 2.0 上所搭載之傳輸模組相同。本研究之定位系統用與微型無人飛行器相同之模組及處理器成功建立及運作，更說明了未來應用於微型無人飛行器的可行性。實驗過程中所使用的微處理器 - STM32F407，其運算能力為每個浮點數加減法約為 0.28us，每個浮點數乘法約為 3.28us，由此便可計算出本研究進行數位訊號處理的主要處理時間，如下表 11。(利用磁場強度計算本身位

置的運算過程因牽涉到的加減乘法數量過少，與訊號處理運算時間的比例懸殊，不列入討論)

表 11 本研究提出之單一參考點定位系統的數位訊號處理演算法執行時間

運算種類	加減法數	乘法數	總運算時間
「特定點之離散傅立葉轉換」	3072	1024	4218.88us

依據表 11，得知約 4.2ms 可完成一次的數位訊號處理，相對其他的定位系統的運算量是相當的低，這是由於此系統無須複雜的雜訊後處理及和參考點之間的冗長通訊，運算量符合幾乎所有無人控制裝置處理器的運算能力。

由此章節的討論，可分析出本研究提出之單一參考點的定位系統應用於微型無人飛行裝置是可行的，此因本定位系統運算量低以及能夠提供 XYZ 三維的空間資訊，加上定位系統本身的穩定性以及精確性，相信未來可應用在更多層面。而本研究定位系統安裝方便的特性，則是目前所有定位系統所無法達到的，僅使用單一參考點始能進行定位，具有多方面的好處，期望此定位系統能在未來無人控制裝置的行動及控制研究有所貢獻。

#### (四) 磁場定位對人體的影響

世界衛生組織(WHO)發表的報告指出，磁場、電場、電磁波主要對人的影響是熱的效應，而目前並沒有任何科學證據可說明電磁波為癌症或其他症狀的成因[22]，也無法說明其對人體有任何不良的影響。但是其與電機電子工程學會(IEEE)、國際非電離輻射防護委員會(ICNIRP)還是針對熱效應的部分定出建議人體不要長期暴露的場強度值，給需要在長期暴露在電場、磁場、電磁波的工作者或民眾有個規範值可參考，下面是針對低頻率的磁場所規範的值所作的討論。

根據電機電子工程學會(IEEE)、世界衛生組織(WHO)以及國際非電離輻射防護委員會(ICNIRP)[23]所訂定之規範，建議一般大眾不要長期暴露在超過磁場感應強度值 $B_T$ 的低頻率(25Hz 到 800Hz)磁場中，如下公式(23)所定義。

$$B_T = 5000/f \quad (23)$$

在此 $B_T$ 值為規範之磁場感應強度，單位為 $\mu T$ ，而 $f$ 為磁場的頻率(Hz)。下表 12 為本研究取 20 個編號的永久磁鐵以及電磁鐵(與表 4 及表 10 所取的編號相同)，計算建議的安全距離及利用討論(一)結果所算出的最大測量範圍。

表 12 二十個不同的磁鐵及電磁鐵的建議安全距離及最大測量範圍

編號	磁鐵建議安全距離(m)	最大測量範圍(m <sup>3</sup> )	電磁鐵建議安全距離(m)	最大測量範圍(m <sup>3</sup> )
1	0.054	43.21336	0.107	55761.4
2	0.117	542.7273	0.17	110850.4
3	0.38	1831.704	0.208	166093.2
4	0.64	4207.545	0.23	222665.1
5	0.9	8063.135	0.254	278261.9
6	1.16	13756.73	0.27	333038.1
7	1.42	21646.59	0.288	389388.6
8	1.68	31834.24	0.3	443273.8
9	1.94	45124.25	0.315	498866
10	2.19	61280.44	0.33	555647.2
11	2.45	81372.65	0.342	613084.7
12	2.7	105436.8	0.352	666939.5
13	2.96	133165.4	0.361	719967.7
14	3.22	166142.5	0.37	775734.6
15	3.49	203276.1	0.38	834309.4
16	3.75	246568.2	0.389	886803.5
17	4	293351.4	0.399	941454.5
18	4.26	348224.2	0.405	998306
19	4.52	408141.4	0.412	1052390
20	4.78	476117.9	0.419	1108393

在此取 100Hz 的頻率，代入公式(23)中計算其 $B_T$ 值，並推得建議的安全距離資訊。表 12 中編號 20 的磁鐵可定位 476117.9 立方公尺的測量範圍，而其建議安全範圍只有 457.47981 立方公尺(取球體， $4 \cdot d^3 \cdot \pi / 3$ )；另一方面，電磁鐵可定位 1108393 立方公尺的範圍，可是其只有 0.30812 立方公尺的建議安全範圍。此說明了磁場定位的可行性；利用磁鐵及電磁鐵作為磁場源皆可量測很大空間的範圍，但其建議安全範圍皆並無佔太大的空間，電磁鐵雖較磁鐵的建議安全範圍小，可是其體積根據表 4 則相對較大。

## 四、結論與未來展望

本研究提出了一套僅需設置單一參考點的定位系統，根據實作過程中所搜集的實驗數據，說明了此定位系統的可行性。以下為歸納出之幾項結論：

- (一) 時變場型的交流磁場包含了距離以及角度的資訊；藉此特性，可由兩個感測器所量測之磁場感應強度訊號的相位差計算出該平面上兩點的實際角度差。
- (二) 將磁阻感測器三軸方向(X,Y,Z)所量測之差動磁場強度平方相加開根號後所得的量值呈圓形場分布，得以利用此純量作物體與磁場源距離的計算。
- (三) 在同一參考點上放入兩個磁場源，並利用分頻多工使其分別產生兩種不同頻率的時變場型之交流磁場，得以同時求出物體在空間中相對於該參考點的仰角( $\theta$ )以及平面旋轉角( $\varphi$ )。
- (四) 使用特定點之離散傅立葉轉換可將時域上的訊號轉至頻域，並只針對特定感興趣的頻率序列進行計算，如此既可使運算時間大幅減短，亦可達成分頻多工，成功計算出分別來自參考點上兩個磁場源的訊號之振幅、頻率以及相位等資訊。
- (五) 永久強力磁鐵取得容易，且無需複雜的附加電路，僅需用一般直流馬達轉動形成足夠強度且穩定的交流磁場，研究過程中用此方案產生時變場型的交流磁場既方便，效率又高。
- (六) 參考點上的兩個磁場源以分頻多工發射出的磁場感應強度訊號在經過特定點之離散傅立葉轉換後，可藉由計算訊號的振幅得知物體與該參考點的距離( $r$ )；亦可由計算出之訊號的相位得知物體在空間中相對於該參考點的仰角( $\theta$ )以及平面旋轉角( $\varphi$ )。如此一來便能得知物體在空間中( $r, \theta, \varphi$ )的座標，達成單一參考點之定位。

本研究提出之定位系統對於未來發展行動裝置、穿戴科技和機器人控制之相關科技領域，需要較精確定位資訊的裝置，將會提供很大的貢獻，不僅只需單一參考點使架設便利性相當高，且其精確度也可由實驗結果中看出能符合定位之需求。本研究未來可朝向下列幾個方向繼續努力：

1. 可進一步改善定位系統的量測範圍：研究磁場源的設置以及感測器放大倍率的調整等，希望能夠在精確度不改變的情況下，成功提升定位系統的測量範圍。
2. 利用電磁鐵作為磁場源產生時變場型進行定位：雖其體積及耗電功率相較於永久磁鐵皆較大，但是其可控制性以及產生訊號之穩定性可提升定位系統的實用性，並且預期可達到更即時的定位能力，可使此單一參考點的定位系統普遍接受度提高。
3. 結合感測網路(sensor networking)以尋求更多的應用：可與許多現有的系統整合，利用此定位系統安裝便利性以及精確性的兩大特性，再加上感測網路中現有可取得的資訊，發展出更多應用並提出貢獻。

經本研究的實驗可得知，以磁場為基礎之定位系統完全不會受到多重路徑干擾以及障礙物阻擋的影響，使此定位系統在室內使用的可行性大幅提升。而磁場為基礎的單一參考點之定位系統亦有裝設便利的好處，預期此系統未來的實用價值相當的高。

本研究針對單一參考點進行定位的研究只是一個開端，未來欲使更多人投入此領域的研究，一同發展出更完整的、穩定性及實用性更高之單一參考點定位系統，更進一步可以將此系統應用在未來的生活及工作範疇中。

## 五、參考文獻

- [1] Mautz, R., & Tilch, S. (2011). Survey of Optical Indoor Positioning Systems. *IEEE International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*.
- [2] Louwers, S., Ramanarayanan, S. C., & Qian, Q. (2013). *Design and Implementation of a Quadcopter with Visual Control*. Retrieved October 8, 2014, from <http://www.es.ele.tue.nl>
- [3] Saab, S. S., & Nakad, Z. S. (2011). A Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(5), 1961-1970.
- [4] Mazuelas, S., Bahillo, A., Lorenzo, R. M., Fernandez, P., Lago, F. A., Garcia, E., Blas, J., ... Abril, E. J. (2009). Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 3(5), 821-831.
- [5] Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y., & L, C. (2013). Bluetooth Indoor Positioning using RSSI and Least Square Estimation. *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE*, 837 - 842.
- [6] Chen, Y., Yang, C., Chang, Y., & Chu, C. (2009). A RSSI-based Algorithm for Indoor Localization Using ZigBee in Wireless Sensor Network . *Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Multimedia Systems* , 70-75.
- [7] Gorostiza, E. M., Galilea, J. L., Franciso Javier Meca Meca, Monzú, D. S., Zapata, F. E., & Puerto, L. P. (2011). Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces. *Sensors*, 11, 5416-5438.
- [8] Blankenbach, J., Norrdine, A., & Hellmers, H. (2011). Adaptive Signal Processing for a Magnetic Indoor Positioning System. *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) International Conference*, 1-9.
- [9] Liao, S., Dourmashkin, P., & Belcher, J. (2004). Introduction to Electricity and Magnetism. Retrieved from MIT Notes.
- [10] Hereman, W. (n.d.). Trilateration: The Mathematics Behind a Local Positioning System.

Retrieved October 8, 2014, from <http://inside.mines.edu>

[11] SEOS. (n.d.). Polar Coordinates. Retrieved January 20, 2015, from <http://www.seos-project.eu>

[12] Ma, J. (n.d.). Modulation and Multiplexing. Retrieved October 8, 2014, from <http://cis.k.hosei.ac.jp>

[13] Torlak, M. (n.d.). Time Division Multiplexing. Retrieved October 8, 2014, from <http://www.utdallas.edu>

[14] Andrews, J. G. (n.d.). Code Division Multiple Access for Wireless Communications. Retrieved October 8, 2014, from <http://users.ece.utexas.edu>

[15] Michailow, N., Gaspar, I., Krone, S., Lentmaier, M., Fettweis, G. (2012). Generalized frequency division multiplexing: Analysis of an alternative multi-carrier technique for next generation cellular systems. *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2012 International Symposium*, 171 - 175.

[16] 余兆棠 (2011)。數位訊號處理。台中：滄海。

[17] Biancacci, N. (2011). FFT corrections for tune measurements. Retrieved January 20, 2015, from <https://indico.cern.ch>

[18] Hanna, W. (2014). Modelling and Control of an Unmanned Aerial Vehicle . Retrieved October 8, 2014, from <https://espace.cdu.edu.au>

[19] Honeywell. (n.d.). 1, 2 and 3 Axis Magnetic Sensors HMC1051/HMC1052L/HMC1053.

Retrieved January 20, 2015, from <http://www51.honeywell.com/>

[20] NdFeB-info. Grades of Neodymium. Retrieved October, 2014, from <http://www.ndfeb-info.com>

[21] Honeywell. (2008). 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002/1021/1022. Retrieved October 9, 2014, from <https://physics.ucsd.edu>

[22] World Health Organization. (2007, June). Electromagnetic fields and public health. *World Health Organization Journal*, 322, 1-4.

[23] International Commission on Non-Ionising Radiation Protection. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494-522.

## 附錄

根據本研究所提出的方案(p.23)，可將位在與 x-z 平面(根據 p.18 圖 13 的定義)上的物體用公式(20)計算其所量測到的磁場感應強度，如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{B}_{\perp} \sin(2\pi ft) + \mathbf{B}_{\parallel} \cos(2\pi ft) \\ &= \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \sin \theta \hat{\mathbf{r}} - \cos \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \sin(2\pi ft) + \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \hat{\mathbf{r}} + \sin \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \cos(2\pi ft) \end{aligned}$$

此代表在該 x-z 平面上，角度為 $\theta$ (定義 x 軸正方向為 $0^\circ$ )，與磁鐵距離為 $r$ 處所量測到的磁場感應強度。本研究在此欲證明隨時間改變場型的交流磁場訊號在磁鐵旋轉同樣是 $\theta$ 角或是其同界角時，磁場感應強度 $\mathbf{B}$ 會是交流訊號的峰值，也就是一個週期中的最大值。所以在此先立下證明目標： $2\pi ft = \theta$  時物體量測到的磁場感應強度 $\mathbf{B}$ 的量值最大。

設 $2\pi ft = \theta + k$  ( $k \in \mathbb{R}$ ,  $k \neq 0 \vee 2\pi n$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ ) 時物體量測到的磁場感應強度為 $\mathbf{B}'$

欲證明： $\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\perp} \sin \theta + \mathbf{B}_{\parallel} \cos \theta \geq \mathbf{B}_{\perp} \sin(\theta + k) + \mathbf{B}_{\parallel} \cos(\theta + k) = \mathbf{B}'$

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= \mathbf{B}_{\perp} \sin \theta + \mathbf{B}_{\parallel} \cos \theta \\ &= \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \sin \theta \hat{\mathbf{r}} - \cos \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \sin \theta + \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \hat{\mathbf{r}} + \sin \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \cos \theta \\ &= \frac{\mu M}{4\pi r^3} 2(\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \hat{\mathbf{r}} = \frac{\mu M}{4\pi r^3} 2\hat{\mathbf{r}} \quad (1) \end{aligned}$$

由(1)，可以算出 $|\mathbf{B}|$

$$\begin{aligned} |\mathbf{B}| &= \sqrt{|\mathbf{x}|^2 + |\mathbf{y}|^2} = \sqrt{(\hat{\mathbf{r}} \cos \theta + \hat{\boldsymbol{\theta}} \sin \theta)^2 + (\hat{\mathbf{r}} \sin \theta - \hat{\boldsymbol{\theta}} \cos \theta)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\mu M}{4\pi r^3}\right)^2 4\hat{\mathbf{r}} \sin^2 \theta + \left(\frac{\mu M}{4\pi r^3}\right)^2 4\hat{\mathbf{r}} \cos^2 \theta} = 2 \frac{\mu M}{4\pi r^3} \quad (2) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
\mathbf{B}' &= \mathbf{B}_\perp \sin(\theta + k) + \mathbf{B}_\parallel \cos(\theta + k) \\
&= \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \sin \theta \hat{\mathbf{r}} - \cos \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \sin(\theta + k) + \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \cos \theta \hat{\mathbf{r}} + \sin \theta \hat{\boldsymbol{\theta}}) \cos(\theta + k) \\
&= \frac{\mu M}{4\pi r^3} \{2((\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \cos k) \hat{\mathbf{r}} - \sin k (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) \hat{\boldsymbol{\theta}}\} \\
&= \frac{\mu M}{4\pi r^3} (2 \cos k \hat{\mathbf{r}} - \sin k \hat{\boldsymbol{\theta}}) \quad (3)
\end{aligned}$$

由(3)，可以算出 $|\mathbf{B}'|$

$$\begin{aligned}
|\mathbf{B}'| &= \sqrt{|\mathbf{x}|^2 + |\mathbf{y}|^2} = \sqrt{(\hat{\mathbf{r}} \cos \theta + \hat{\boldsymbol{\theta}} \sin \theta)^2 + (\hat{\mathbf{r}} \sin \theta - \hat{\boldsymbol{\theta}} \cos \theta)^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{\mu M}{4\pi r^3}\right)^2 (2 \cos k \cos \theta - \sin k \sin \theta)^2 + \left(\frac{\mu M}{4\pi r^3}\right)^2 (2 \cos k \sin \theta + \sin k \cos \theta)^2} \\
&= \sqrt{\left(\frac{\mu M}{4\pi r^3}\right)^2 (4 \cos^2 k + \sin^2 k)} \\
&= \frac{\mu M}{4\pi r^3} \sqrt{3 \cos^2 k + 1} \quad (4)
\end{aligned}$$

由(2)與(4)得

$$|\mathbf{B}| > |\mathbf{B}'| \quad (\text{已定義 } k \neq 0 \vee 2\pi n)$$

得證 $2\pi f t = \theta$  時物體量測到的磁場感應強度 $\mathbf{B}$ 的量值最大

## I. Introduction

Since unmanned vehicles and unmanned aerial vehicles are developing quickly, an indoor positioning system for calculating their precise positions is necessary. Indoor positioning systems such as RSSI-based or Infrared-based require more than three beacons to obtain an accurate position of an object, and they may be easily interfered by obstructions [1] – [5]. Magnetic indoor positioning systems are robust against radio interference and environmental obstructions. Reference [6] has used DC magnetic field signal strength and places multiple transmitting coils for indoor positioning, which demands complex setup procedures.

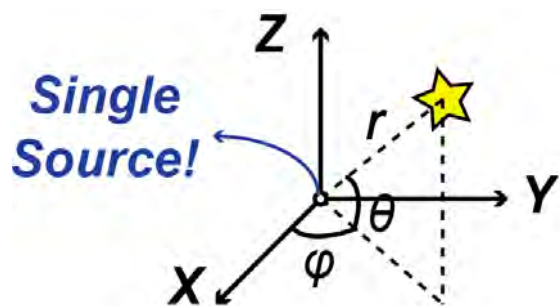
In order to minimize the number of beacons installed for positioning, reference [7] has presented a single base station using ultrasonic reflections and fingerprinting method. The use of smart antennas and RFID tags in [8] and [9] also achieve single base station positioning. According to [10] – [11], positioning beacons are unnecessary based on the prepared magnetic flux density maps. However, their positioning errors are about 1 meter in a normal sized room, which is too great to obtain a precise location of an object. Furthermore, site surveys are required due to the use of fingerprinting methods. Hence, an instant setup system for precise indoor positioning has not yet been created.

A magnetic tracking method using a source with two mutually orthogonal coils fed with phase quadrature currents has been mentioned in [12]. This method has been proposed theoretically, which didn't take cumulative errors of actual cases into consideration. Reference [13] is another magnetic tracking method using a source with three mutually orthogonal coils and a uniaxial sensing coil. However, it requires a rotary stage to rotate the sensing coil in all

directions and determine the maximum value. Hence, these tracking methods aren't suitable for constructing an instant positioning system.

The study aimed to develop a Single-Source 3D Positioning System, which can be setup instantly and lower installation costs. Compared to positioning systems using Received Signal Strength (RSS) and trilateration methods to calculate the position of an object in a Cartesian coordinate system, the study is considered to determine the position of an object in a spherical coordinate system. The distance ( $r$ ), the elevation angle ( $\theta$ ), and the azimuth angle ( $\varphi$ ) of an object are the three parameters needed for positioning. By doing this, the positioning system requires only one source. The three parameters are proposed to be calculated based on the magnetic field due to its excellent capability of penetrating through various obstacles. Therefore, the distance between the source and object can be calculated from the strength of the magnetic field. In order to calculate the elevation angle ( $\theta$ ) and azimuth angle ( $\varphi$ ) of an object, rotating magnetic fields have been proposed. The rotating magnetic field is designed to have the characteristics of its phase related to the actual rotation angle of the object and can provide the angle information to the system for positioning.

Overall, the study is focused on constructing a Single-Source 3D Positioning System generating two rotating magnetic fields to calculate the accurate 3D position of an object in a spherical coordinate system.



**Fig.1. Single-Source Positioning System**

## II. Methods

The distance between the source and object ( $r$ ), the elevation angle ( $\theta$ ), and the azimuth angle ( $\varphi$ ), these three parameters are required to achieve single-source positioning. Hence, the following methods are used to obtain this information. The received magnetic field signal strength is implemented to indicate the distance. Rotating magnetic fields are used to compute the angles.

After combining Frequency Division Multiplexing, a brand new design with three mutually orthogonal coils is established to generate rotating magnetic fields in two different frequencies and directions. For the sensing object, the HMC1053 3-axis magnetometer from Honeywell is used to receive the magnetic field signals, an algorithm for Digital Signal Processing to extract the three parameters from the magnetic field strength signal is presented. In general, all tasks are conducted by STM32F407 micro-controller units.

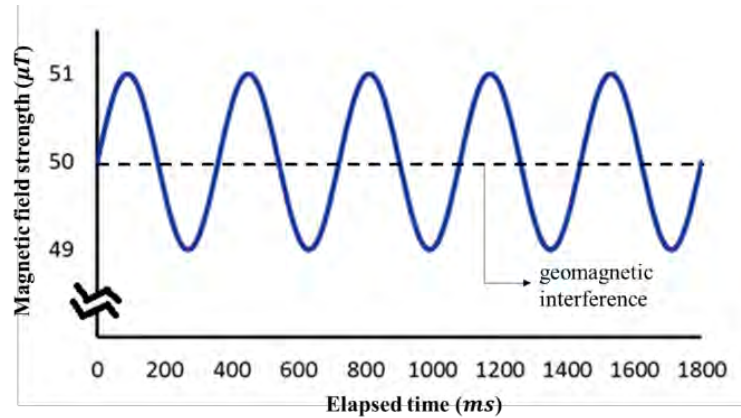
After implementing these methods, a single-source 3D positioning system - Magnetic Positioning Sphere (MPS) has been created.

### A. *Received Magnetic Field Signal Strength*

According to Biot-Savart Law, the magnetic field strength received by an object is reciprocally proportional to the cube of distance between the wire with electric current flow and the object. A magnetic dipole model derived from Biot-Savart Law also shares the same relationship. In this study, the transmitting source of the single-source positioning system is assumed as a magnetic dipole.

To neutralize the effects caused by DC field interference, such as geomagnetism, AC magnetic field signals are transmitted instead of DC magnetic field signals. Magnetic field signal strength can then be indicated by

the amplitude of the received signal.



**Fig.2. AC magnetic field signal**

After the AC magnetic field signal is captured by a magnetometer, the unit of the signal is transferred into Volts instead of Teslas. According to [14], magnetic field strength is proportional to output voltages. Hence, the distance ( $r$ ) between the source and the object can be calculated by formula (1).

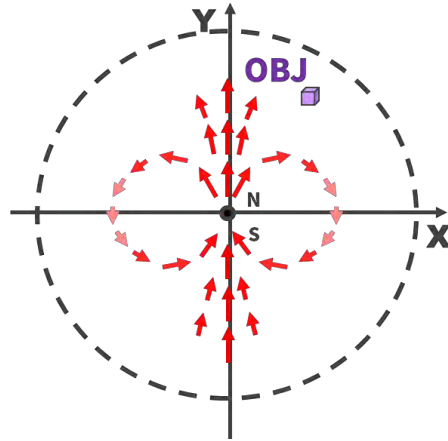
$$r = \sqrt[3]{\frac{K_{mp}}{A_m}} \quad (1)$$

$K_{mp}$  is the magnetic positioning constant, which only needs to be calibrated once for each sensing objects, while  $A_m$  is the amplitude of the received signal (V).

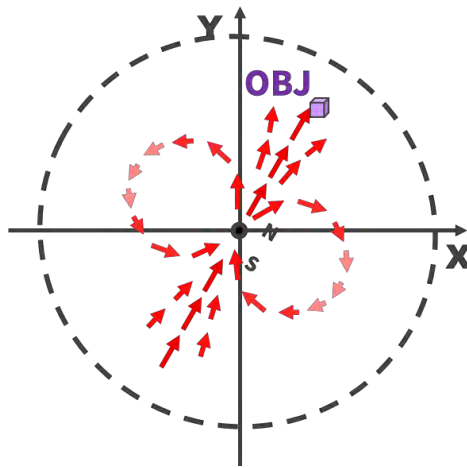
### *B. Rotating Magnetic Fields for Calculating Angles*

#### 1. The Concept of a Rotating Magnetic Field

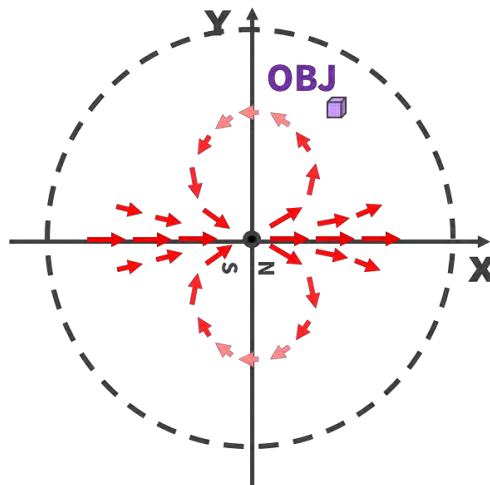
A rotating magnetic field refers to a magnetic field generated by a rotating magnetic dipole. Magnetic field strength received by an object varies over time Figure 3 (A) to 3 (C) indicate field generate by a rotating magnetic dipole from  $t_1 \sim t_3$  .



(A) Field generated at  $t_1$



(B) Field generated at  $t_2$

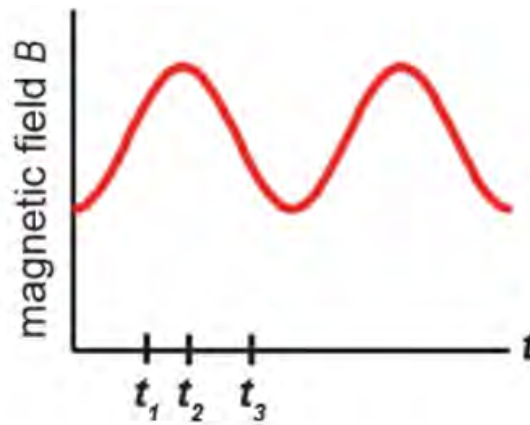


(C) Field generated at  $t_3$

**Fig.3. Rotating magnetic fields generated by a magnetic dipole**

OBJ indicates an arbitrary object on XY plane.

An arbitrary object (OBJ) receives a magnetic field strength signal which is approximate to a sinusoidal wave, which is shown in Fig.4.



**Fig.4. Magnetic field signal received by OBJ at different timestamps in a rotation cycle of a rotating magnetic field**

The maximum value of the magnetic field strength signal received by OBJ in half of a rotation cycle takes place at  $t_2$ , when the north pole of the magnetic dipole faces OBJ according to Fig.3. This reveals the characteristic of a rotating magnetic field, in which the maximum value of signals captured at different rotation angles on the plane takes place at different times. Based on this concept, the rotation angle between two objects can be computed using the phase difference of the two signals captured.

## 2. Calculation of Angles using a Rotating Magnetic Field

Rotating magnetic fields can not only be generated by rotating magnetic dipoles but also electromagnets. Reference [12] suggests that two ideally mutual orthogonal coils fed with phase quadrature currents are able to generate a rotating magnetic field. In this study, electromagnets are used to implement a source generating rotating magnetic fields due to its stability as compared to rotating magnets. For angle calculations, while focusing on calculating the angle of object from 0 to 180 degrees, the maximum strength

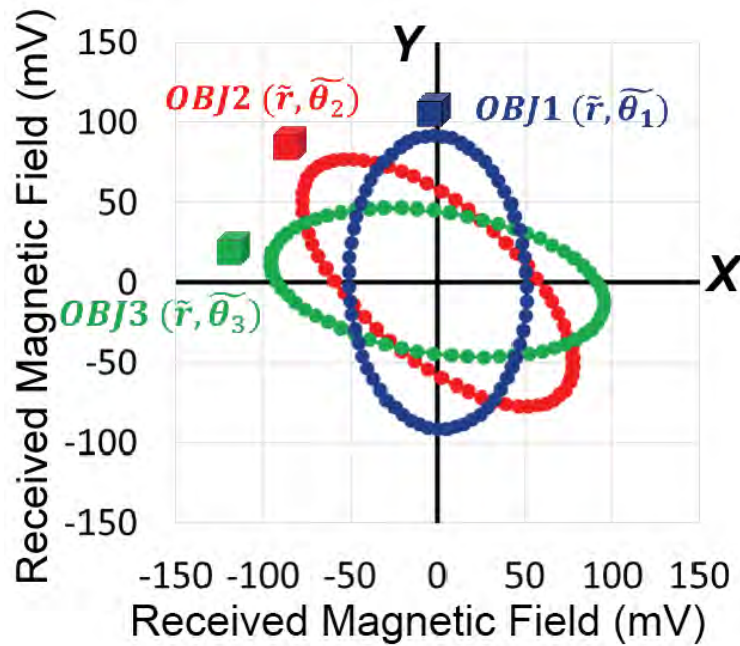


of the magnetic field occurs at  $\tilde{t}$ .

The actual angle of an object  $\tilde{\theta}$  can be calculated using formula (2), while  $\omega$  is the angular frequency of a rotating magnetic field.

$$\tilde{\theta} = \omega \tilde{t} \quad (2)$$

Fig.5 shows the magnetic field received by three objects at different angles while the sensor of each object is fixed in a particular direction. It's obvious that the time when the maximum value of the magnetic field strength occurs is related to the actual angle of objects. In this study, the time difference between two signals is used to calculate the angle between two objects based on this concept.

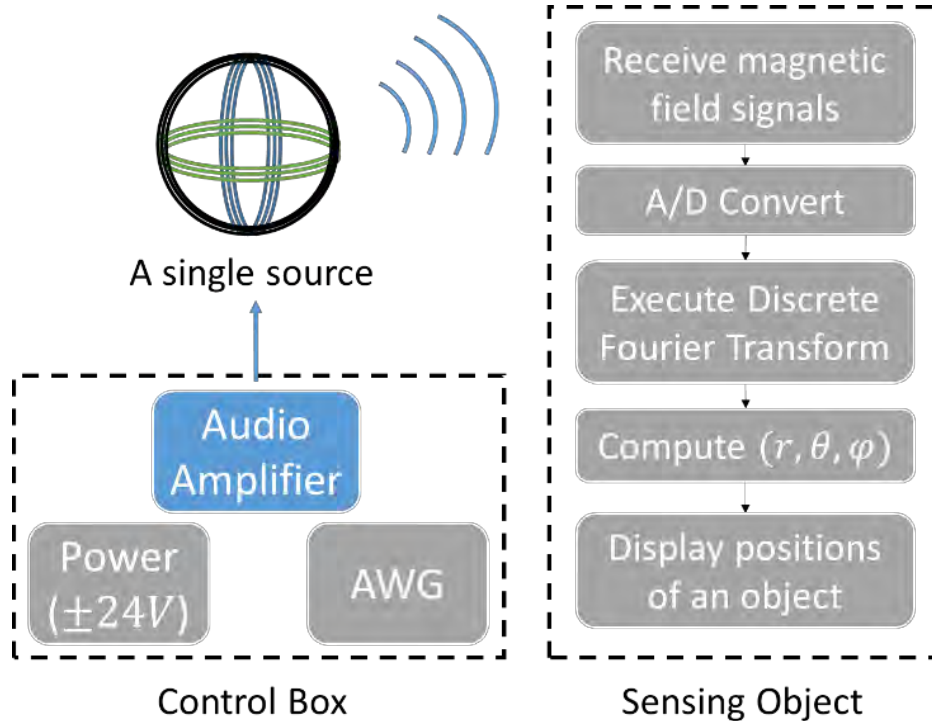


**Fig.5. Magnetic field received over time by three objects at different angles while two axes of the sensor are fixed on X & Y axis**

While  $\tilde{r}$  tells the distance measured between the origin point and the object, polar coordinate of an object  $k$  can be labeled  $(\tilde{r}, \tilde{\theta}_k)$

### C. Development of a Single-Source Positioning System

Flow chart of a single-source positioning system is shown in Fig. 6.



**Fig. 6. Flow chart of a single-source positioning system**

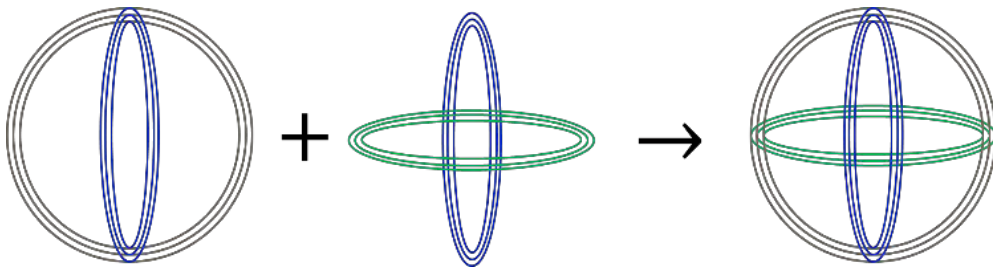
This single-source positioning system is composed of a source, a control box, and a sensing object.

The Arbitrary Waveform Generator (AWG) in the control box outputs phase-quadrature signals. After increasing the signals using audio amplifiers, they are sent into the source. The sensing object then receives magnetic field signals, and it's able to obtain its positioning after calculation processes.

To develop a sensing object executing its program, a micro-controller unit – STM32F407 is used. Open source libraries such as STM32F4 standard peripheral library from STMicroelectronics and discovery board library are referenced for the integration of an MPS system. HMC1053 three-axis magnetometer from Honeywell is implemented to receive magnetic field signals [15]. Also, an LCD is used to display the position of an object.

## 1. Introduction of the Magnetic Positioning Sphere

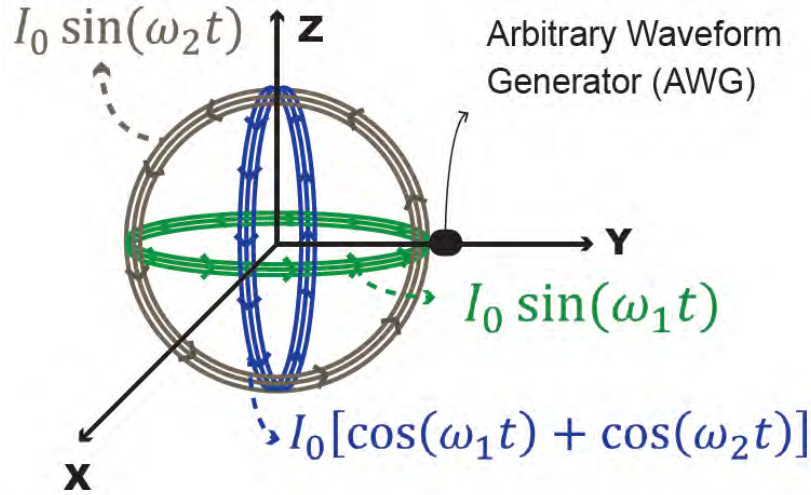
In this study, two rotating magnetic fields are required to calculate the elevation angle and azimuth angle of an object. Hence, dual sets of two mutually orthogonal coils generating rotating magnetic fields on two angled planes are required. To simplify the transmitting apparatus, an innovative design with three mutually orthogonal coils is introduced.



**Fig.8. Introduction of a novel design with three mutually orthogonal coils**

Recognition of rotating magnetic fields on two different angled planes is relatively important when positioning. To achieve this, Frequency Division Multiplexing (FDM) is used in conjunction with magnetic fields. The magnetic fields are set to rotate on each angled plane at different angular frequencies. Objects can then execute Discrete Fourier Transform (DFT) to calculate the Fourier Coefficients of each frequency. Based on these parameters, the amplitude and phase of each signal can be calculated, and the distance, elevation angle, and azimuth angle of an object can be derived. Details of the calculation processes can be seen in the later section.

As the transmitting source is simplified to a three mutually orthogonal coil design, these coils are fed with signals shown in Fig.9.



**Fig.9. Magnetic Positioning Sphere (MPS)**

Two sets of phase quadrature signals with different frequencies are sent from the source to generate rotating magnetic fields at two different angular speeds. By doing this, the transmitting source is equivalent to two mechanically rotating magnetic dipoles, calculating two angles of an object.

After implementing these methods, a Magnetic Positioning Sphere (MPS) has been introduced.

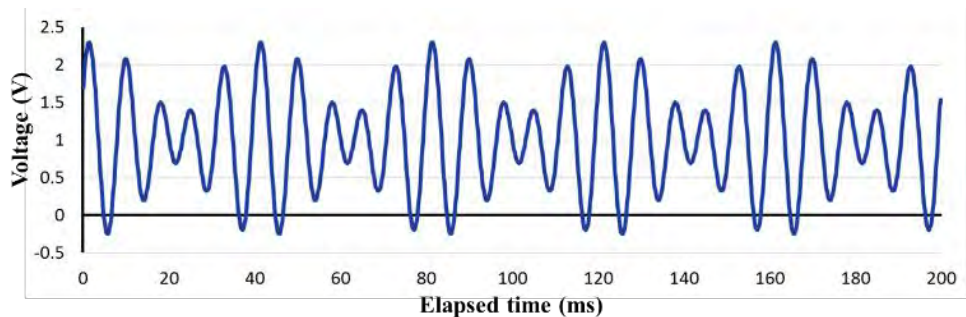
As the MPS is composed of three mutually orthogonal coils, the magnetic field strength received by an object at position  $(r, \theta, \varphi)$  can be described by formula (3).

$$B = \frac{\mu_0 N I_0 A}{4\sqrt{2}\pi r^3} \left\{ \sqrt{3 \cos[2(\theta - \omega_1 t)] + 5} + \sqrt{3 \cos[2(\varphi - \omega_2 t)] + 5} \right\} \quad (3)$$

$\mu_0$  is the magnetic constant;  $N$  stands for turns of the coils;  $I_0$  is the electric current flow;  $A$  represents the area of a coil;  $\theta$  and  $\varphi$  are the elevation angle and azimuth angle of an object;  $\omega_1$  and  $\omega_2$  show the angular frequencies of two rotating magnetic fields;  $t$  tells the time elapsed.

## 2. Digital Signal Processing for Magnetic Positioning Sphere System

Frequency Division Multiplexing (FDM) allows an object to gather two rotating magnetic field signals simultaneously. As shown in Fig.10, an object receives a composite signal with 125 Hz, 100 Hz, and DC signals, which simulate rotating magnetic field signals at two different frequencies and DC interferences.



**Fig.10. Composite signal of 125 Hz, 100 Hz, and DC on time-domain**

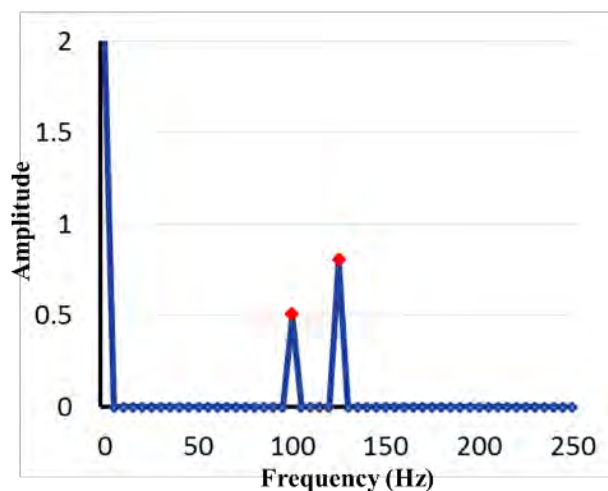
After the object receives a composite signal, determination of each rotating magnetic field signal is necessary. As the angular frequencies of rotating magnetic fields can be controlled, the signal captured is coherent at a specific amount of time. Due to this, amplitude of signal is able to be centralized to one frequency on the frequency-domain. Hence, “Discrete Fourier Transform (DFT) for a Specific Point” is used to determine rotating magnetic field signals in two different frequencies. Instead of computing all the coefficient in different frequencies on frequency-domain, specific frequencies such as 100 Hz and 125 Hz are only required in this calculation.

A three-axis magnetometer receives the magnetic field strength signal in three different directions. However, according to the characteristics of rotating magnetic fields, these vector components have to be summed up to get the strength of the magnetic field vector. Due to this, after obtaining the

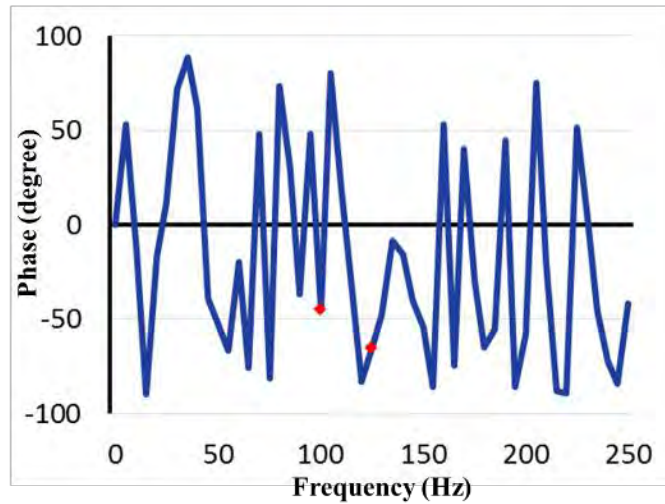
Fourier coefficients by executing “DFT for a Specific Point” on signals captured from three directions, an algorithm to calculate the amplitude and phase of rotating magnetic field signals from three sets of Fourier coefficients is required.

Fourier coefficient contains a real part ( $Re$ ) and an imaginary part ( $Im$ ), for example,  $a \cos \theta + ib \sin \theta$ . To calculate the magnetic field vector, the root sum square of Fourier coefficient in three directions has to be calculated. After this, the amplitude of the signal can be calculated by  $\sqrt{Re^2 + Im^2}$ , and the phase of the signal can be calculated by  $\tan^{-1} \frac{Im}{Re}$ . However, according to De Moivre's theorem, argument of the square of a Fourier coefficient is doubled. Hence, the actual phase of the rotating magnetic field signal is half of the phase that is calculated.

After these processes, two parameters, amplitude and phase, of the signal is acquired to calculate the distance ( $r$ ), elevation angle ( $\theta$ ), and azimuth angle ( $\varphi$ ) of an object. Calculation results using a simulation signal in Fig.10 are shown in Fig.11 and Fig.12.



**Fig.11. Amplitude calculation of the simulation signal.** Red dots show the only points calculated during Discrete Fourier Transform of MPS



**Fig.12. Phase calculation of the simulation signal.** Red dots show the only points calculated during Discrete Fourier Transform of MPS

### 3. Implementation

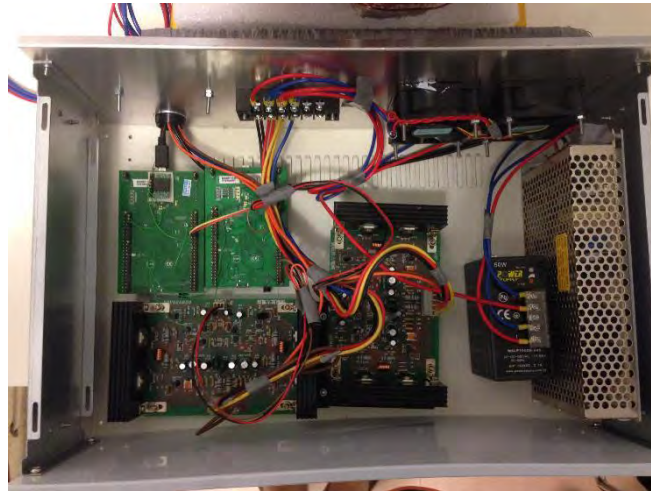
The MPS system is composed of a Magnetic Positioning Sphere, an Arbitrary Waveform Generator for generating designated signals, and a sensing object equipped with magnetometer. The Magnetic Positioning Sphere is composed of three mutually orthogonal coils. Before experimentation, a sphere with 200 turns of coils each is constructed, shown in Fig.10.



**Fig.13. Magnetic Positioning Sphere Prototype**



With regards to the control box, it is composed of an Arbitrary Waveform Generator (AWG) with two MCUs containing three Digital-to-Analog Converters (DACs) and amplifiers to increase the electric current flow of signals. All of these components, along with a power supply, and a couple of fans are put into a box, as shown in Fig.14.



**Fig.14. Control box**

For the sensing object, a Discovery Board with STM32F407 is used to execute all the computations. This is combined with the three-axis magnetometer, the HMC1053, a new PCB layout compatible with the Discovery Board has been established. This new sensing object layout uses an LCD module and a mobile power source, as shown in Fig.15.



**Fig.15. Sensing object**

After these processes, a single-source positioning system – Magnetic Positioning Sphere has been created.

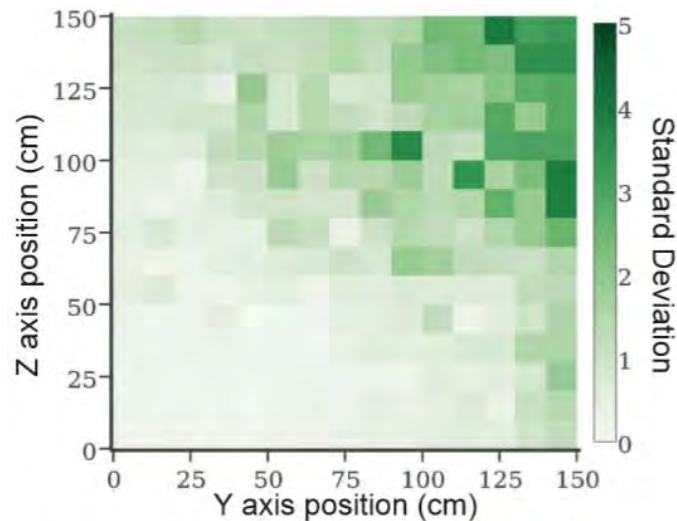


### III. Results

During experimentation,  $NI_0A$  value, which is explained in formula (3), the signal gain of the magnetometer, and the granularity of Analog-to-Digital Converters (ADCs) are found to be related to the positioning ability, or positioning range, of the MPS system. After experiments, the stability, positioning accuracy and coverage of the MPS system can be determined.

#### A. Stability of Magnetic Positioning Sphere System

Fig.16 shows the standard deviation of MPS positioning errors on a section in a 3D space. Using the following parameters  $NI_0A = 8.32$ , Sensor Gain = 212.8, along with a series of 12 bit Analog to Digital converters were used to capture the signals. The resulting data was collected from the sensors.



**Fig.16. Standard deviation of positioning error**

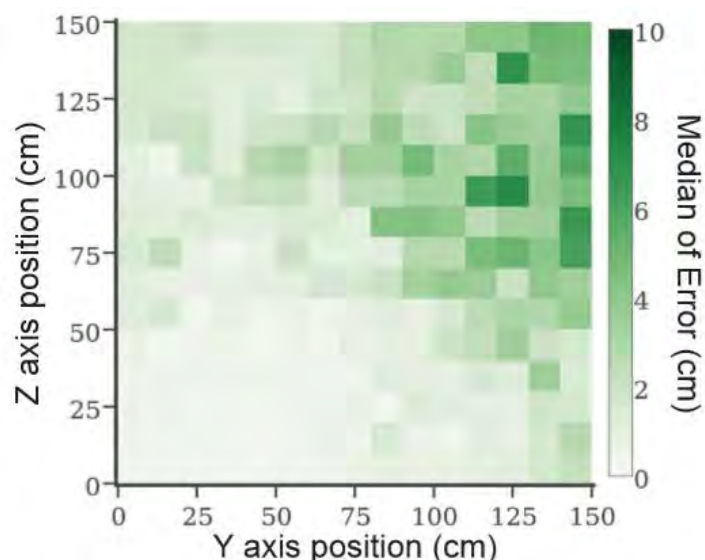
These are the standard deviations of 80 error values. They show that the MPS system has exceptional stability in the range of 150 cm under these particular conditions, which shares the standard deviation of within 2. For further distances, standard deviation of positioning errors rise due to the increase of the overall positioning error. However, they're negligible.

## B. Positioning Accuracy of Magnetic Positioning Sphere System

For the positioning accuracy of the MPS system, it's separated into two parts to conduct experiments. The first part shows the median of positioning errors on a section in a 3D space, which shares the same area and conditions as the data gathered in Fig.16. The other one shows the Cumulative Distributive Function (CDF) of positioning errors in different zones, or positioning range. In this part, comparison between positioning with and without obstructions is also established to show the excellent capability of the MPS system against environment obstructions.

### 1. Median of Positioning Error

Fig.17 shows the median of MPS positioning errors on a section in a 3D space. Using the following parameters  $NI_0A = 8.32$ , Sensor Gain = 212.8, along with a series of 12 bit Analog to Digital converters were used to capture the signals. The resulting data was collected from the sensors.



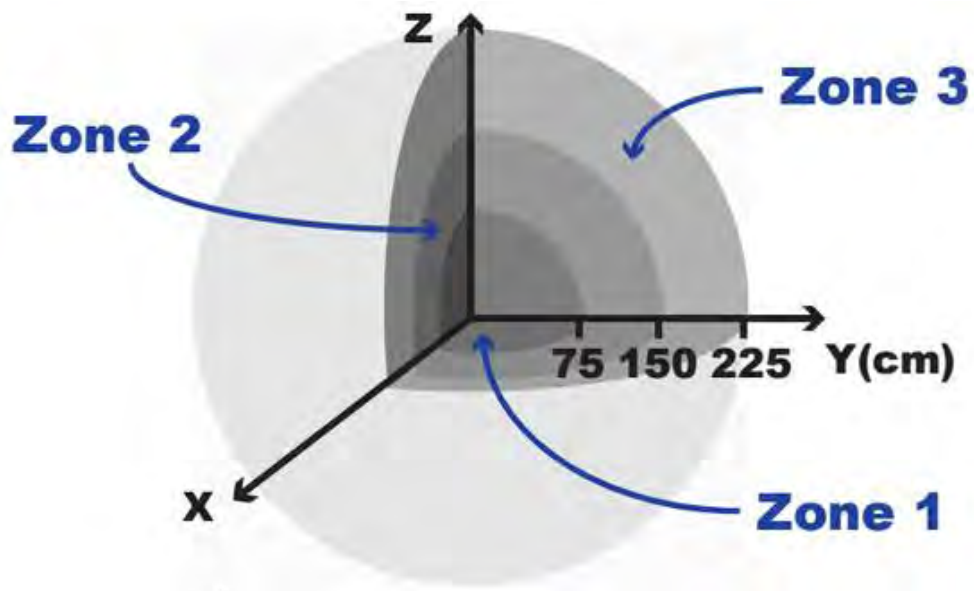
**Fig.17. Median of positioning error**

These are the median of 80 error values. They show that the MPS system is able to obtain precise positioning values in the range of 150cm

under this particular condition, which has a median error to within 5 cm. For further distances, median of positioning error rises as the amplitude of the rotating magnetic field signals decrease to white noise levels. However, the overall positioning error of the MPS system remains negligible.

## 2. Positioning Accuracy with and without Obstructions in Different Zones

First of all, 3D space where the MPS system is able to obtain the position of objects is split into zones with different positioning ranges, as shown in Fig.18.

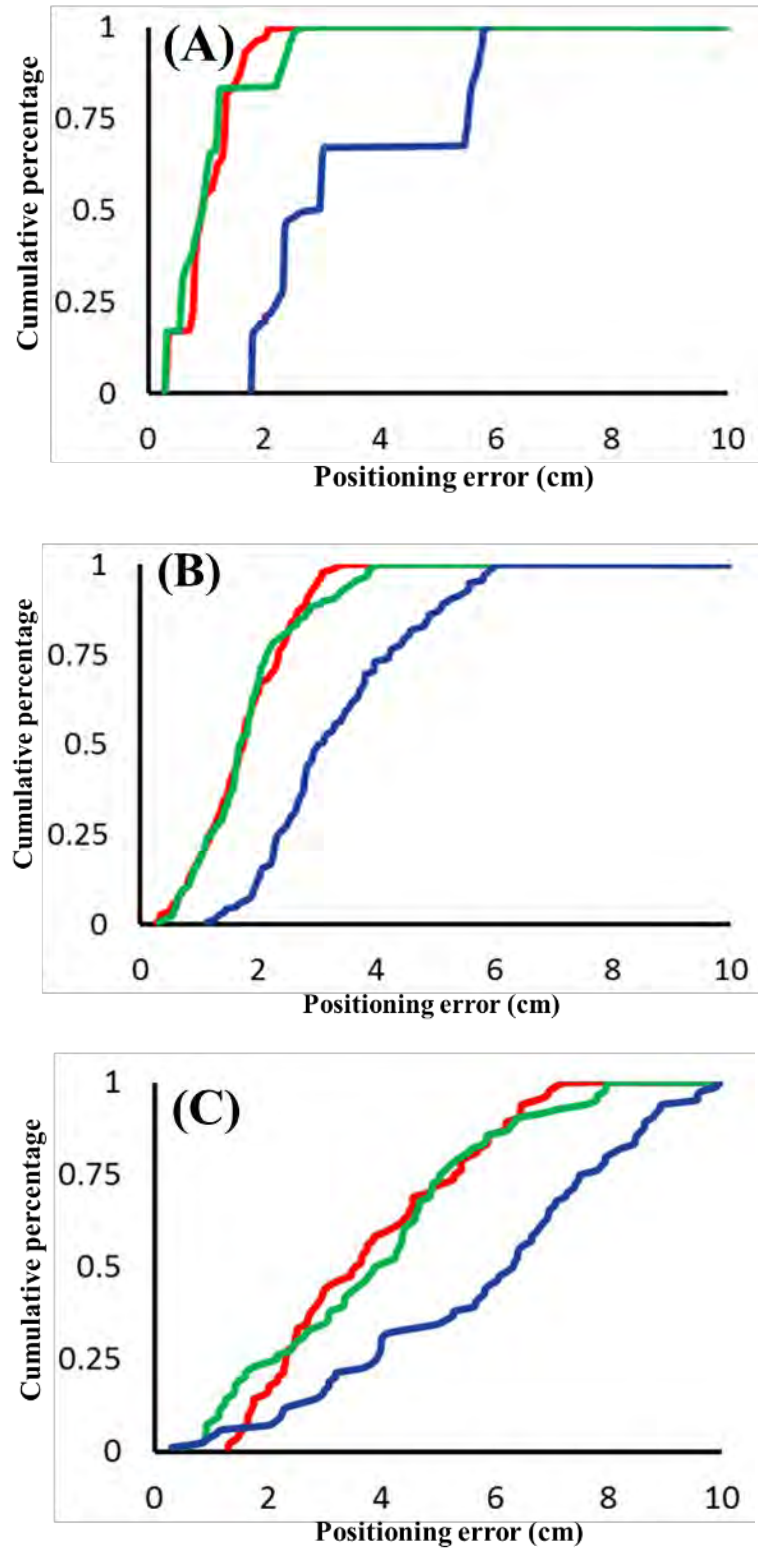


**Fig.18. Definition of zones**

For **Zone 1** and **Zone 2**, data are acquired under the condition of  $NI_0A = 4.16$ , gain of the sensor = 212.8, and use of 12 bits Analog-to-Digital Converters (ADCs) to capture signals. For **Zone 3**, data are acquired under the condition of  $NI_0A = 8.32$ , and the other two factors remain.

Fig. 19 (A) to (C) is the CDF of positioning error in three zones.

■ w/o obstructions   ■ w/ wooden obstructions   ■ w/ metal obstructions



**Fig.19. Cumulative Distribution Function for positioning error**

(A) Zone 1   (B) Zone 2   (C) Zone 3

According to Fig.19, wooden obstructions cause little to no effect on positioning, while metal obstructions cause a little more error due to the induction fields. From this, it can not only prove that the MPS system is robust against environmental obstructions, but also restate that the MPS system are able to obtain precise positioning values.

### C. Coverage of Magnetic Positioning Sphere System

Coverage of the MPS system is determined by the amplitude of rotating magnetic field signals. While the amplitudes of the target frequencies, which are the angular frequencies of two rotating magnetic field signals, are two times greater than the noises level, it is defined as the MPS system is able to cover that range. Based on this, experiments are conducted by adjusting different  $NI_0A$  values, signal gain of the sensor, and the granularity of the ADCs. Following tables are the experiment results.

**Table 1. Positioning range for different  $NI_0A$  values**

$NI_0A$	Measured range (m)	Ideal range (m)
1.15	1.46	2.64
2.89	1.88	3.59
5.39	2.51	4.57
8.32	2.68	5.12
62.83	5.32	10.15
353.43	N/A	18.06
1963.50	N/A	31.99
3848.45	N/A	40.03

**Table 2. Positioning range for different sensitivities of the sensing object**

<b><math>NI_0A</math></b>	<b>Bits of ADC</b>	<b>Gain of sensors</b>	<b>Measured Range (m)</b>
2.89	12 bits	212.77	1.88
		638.3	2.21
	16 bits	212.77	1.95
		638.3	2.29
8.32	12 bits	212.77	2.68
		638.3	3.17
	16 bits	212.77	2.76
		638.3	3.19

Table 1 shows the positioning range for different  $NI_0A$  values. Signal gain of the sensor and the granularity of ADCs are set to 212.8 and 12bits. It is shown that the measured positioning ranges is around 50~60% of theoretical ranges. Hence, sensitivities of objects are adjusted to approximate theoretical values. Measurements conducted up to 62.83 of the  $NI_0A$  values. For greater values, they are unable to be set during experiments due to the complicated procedures for constructing the source. Table 2 take two  $NI_0A$  values for examples, showing that by increasing the sensitivities of the sensing object can help increase the coverage of MPS system. Adjusting gain of the sensor is able to increase the amplitude of the received signals, while using ADCs with greater granularity has better recognition to an AC signal. Adjusting these two factors, overall, is contributive to increasing the coverage of the MPS system.

## IV. Discussions

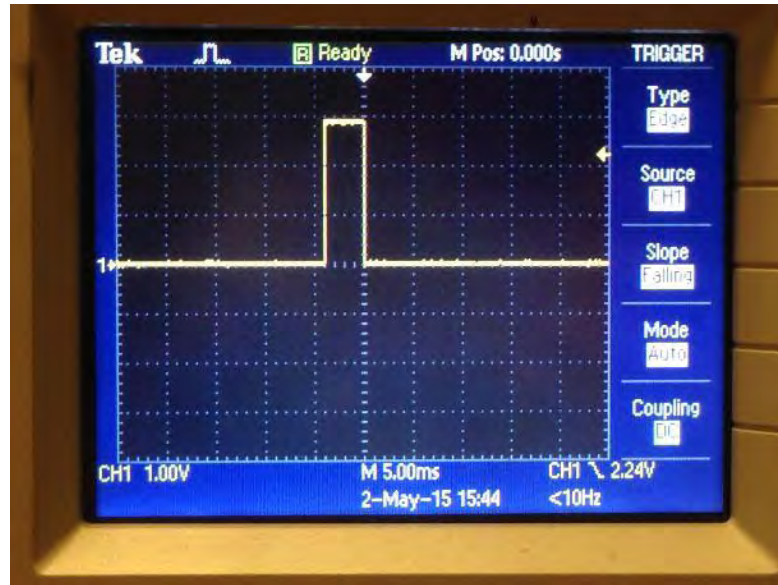
After introduction of the MPS system and determination of its stability, accuracy, and coverage, discussions about effects on human bodies and the computation time of a position have been done.

### A. *Effects on Human Bodies*

Research conducted by World Health Organization (WHO) suggests that the main effect on human bodies cause by magnetic field, electric field, and electromagnetic waves is heat [16]. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), World Health Organization (WHO), and International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection have set up guidelines for limiting exposure under magnetic field, electric field, and electromagnetic waves [17]. One of the lines suggest that it is recommended no to be exposed under magnetic field strength greater than  $B_T = 5000/f$  for a very long period of time.  $f$  stands for frequencies between 25 Hz to 800 Hz (Extreme Low Frequency), while the unit of  $B_T$  is  $\mu T$ . Compared with higher frequencies time-varying fields commonly used on cellphones or radios nowadays, the range of 25 Hz to 800 Hz, which is the range of rotating magnetic field signals, is relatively harmless to human bodies.

### B. *Computation Time of a position*

Due to the use of “DFT for a Specific Point” during calculation, computation for a single position has been simplified. According to the measurements, processing time after capturing the signals is within 5 milliseconds, as shown in Fig.17.



**Fig. 17. Measurement of computation time for a single position**

The width of the pulse indicates the computation time for a single position. It shows that the MPS system is able to compute a position in a very short amount of time. Using this characteristic, the MPS system is compatible for various applications. For example, it's able to complete calculation of positions of fast-moving objects such as Unmanned Aerial Vehicles for indoors, showing the value of MPS system.



## V. Conclusions

In this study, a Magnetic Positioning Sphere (MPS) has been introduced to generate rotating magnetic fields in two different frequencies using Frequency Division Multiplexing. Also, methods used such as “DFT for a Specific Point” help the MPS system to achieve robust positioning and simplify the system structure. After implementing the Magnetic Positioning Sphere (MPS) and all the methods mentioned, a single-source 3D positioning system has been created. Error of MPS positioning is in the range of 0~10 cm with the positioning distance to around two meters under experimental settings. Results also reveal that the MPS system is robust against environment obstructions, which can be used for numerous applications as compared with RSSI-based, Infrared-based, or optical-based positioning systems. For future applications, due to the MPS system can be installed in seconds, it is considered to be implemented on applications which demand to setup instantly a positioning system and obtain the precise position of an object. For example, this can be used for the navigation of firefighters, robots, or UAVs when rescuing indoors. By implementing on uses like this, the MPS system is believed to become an indispensable tool on countless applications around the globe.

In the future, solutions for increasing the positioning range of MPS system is necessary. Assume the sensitivity of sensing object reaches theoretical value, positioning range is able to achieve 80 meters by constructing a transmitting source with coils that are 1000 turns as well as 1 meter of radius and fed with electric current flow of 10 Amperes. Tradeoff between the three parameters ( $N \cdot I_0 \cdot A$ ) and power consumption must be considered for constructing MPS system on various applications.

This study is just the beginning of single-source positioning system using magnetic fields, it is expected to be developed with other researchers, making it easier and more commonly used in the future.

## VI. References

- [1] Gorostiza, E. M., Galilea, J. L., Franciso Javier Meca Meca, Monzú, D. S., Zapata, F. E., & Puerto, L. P. (2011). Infrared Sensor System for Mobile-Robot Positioning in Intelligent Spaces. *Sensors*, *11*, 5416-5438.
- [2] Saab, S. S., & Nakad, Z. S. (2011). A Standalone RFID Indoor Positioning System Using Passive Tags. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58*(5), 1961-1970.
- [3] Mazuelas, S., Bahillo, A., Lorenzo, R. M., Fernandez, P., Lago, F. A., Garcia, E., Blas, J., Abril, E. J. (2009). Robust Indoor Positioning Provided by Real-Time RSSI Values in Unmodified WLAN Networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, *3*(5), 821-831.
- [4] Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y., & L, C. (2013). Bluetooth Indoor Positioning using RSSI and Least Square Estimation. *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE*, 837 - 842.
- [5] Chen, Y., Yang, C., Chang, Y., & Chu, C. (2009). A RSSI-based Algorithm for Indoor Localization Using ZigBee in Wireless Sensor Network. *Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Multimedia Systems*, 70-75.
- [6] Blankenbach, J., Norrdine, A., & Hellmers, H. (2013). An IMU/magnetometer-based Indoor positioning system using Kalman filtering. *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) International Conference*, 1-9.
- [7] Dijk, E., Berkel, K. v., Aarts, R., & Loenen, E. v. (2003). Single Base-station 3D Positioning Method using Ultrasonic Reflections. *Proc. of the Int. Conf. on Ubiquitous Computing*, 199 - 200.
- [8] Giorgetti, G., Cidronali, A., Sandeep K. S. Gupta, & Manes, G. (2009, January). Single-Anchor Indoor Localization Using a Switched-Beam Antenna. *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, *13*(1), 1-3.
- [9] Hatthasin, U., Thainimit, S., Vibhatavanij, K., Premasathian, N., & Worasawate,

- D. (2010, July). The use of RTOF and RSS for a one base station RFID system . *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 10(7), 1-11.
- [10] Vandermeulen, D., Vercauteren, C., & Weyn, M. (2013). Indoor localization Using Magnetic Flux Density Map of a Building. *The Third International Conference on Ambient Computing, Applications, Services and Technologies*, 42-49.
- [11] Rahok, S. A., & Koichi, O. (2009, February 10-12). Odometry Correction with Localization Based on Landmarkless Magnetic Map for Navigation System of Indoor Mobile Robot. *Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents*, 572-577.
- [12] Paperno, E., Sasada, I., & Leonovich, E. (2001). A New Method for Magnetic Position and Orientation Tracking. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 37(4), 1938-1940.
- [13] Song, S., Qiao, W., Li, B., Hu, C., Ren, H., & Max Q.-H. Meng (2014, January). An Efficient Magnetic Tracking Method Using Uniaxial Sensing Coil. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 50(1), 1-7.
- [14] Honeywell. (2008). 1- and 2-Axis Magnetic Sensors HMC1001/1002/1021/1022. Retrieved October 9, 2014, from <https://physics.ucsd.edu>
- [15] Honeywell. (n.d.). 1, 2 and 3 Axis Magnetic Sensors HMC1051/HMC1052L/HMC1053. Retrieved January 20, 2015, from <http://www51.honeywell.com/>
- [16] World Health Organization. (2007, June). Electromagnetic fields and public health. *World Health Organization Journal*, 322, 1-4.
- [17] International Commission on Non-Ionising Radiation Protection. (1998). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics*, 74(4), 494-522.

## 【評語】 100002

1. 利用分頻多工及交流差動磁場強度定位系統具有創意值得鼓勵。
2. 事實上此系統可視為兩個方向的定位系統，該系統的設計與優化可以朝此面向思考。
3. 系統的誤差建議可以作進一步的探討，除了機構的精確度會影響系統誤差，在磁場的分析部分也許可以改進。